



**KARBONBAZLI REÇİNE ORGANO KİL
NANOKOMPOZİTLER İLE URANYUM
GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Arvin SEHHATİGDİRİ

Danışman: Prof. Dr. Ahmet GÜRSES
Doktora Tezi
Nano Bilim ve Nano Mühendislik Ana Bilim Dalı
2024

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANO BİLİM VE NANO MÜHENDİSLİK ANA BİLİM DALI

**KARBONBAZLI REÇİNE ORGANO KİL NANOKOMPOZİTLER İLE URANYUM
GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of Uranium Removal With Carbon-Based Resin Organo Clay Nanocomposites)

DOKTORA TEZİ

Arvin SEHHATİGDİRİ

Danışman: Prof. Dr. Ahmet GÜRSES

Erzurum
Temmuz, 2024

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**KARBONBAZLI REÇİNE ORGANO KİL NANOKOMPOZİTLER İLE
URANYUM GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Prof.Dr.Ahmet GÜRSERES danışmanlığında, Arvin SEHHATIGDIRI tarafından hazırlanan bu çalışma, 16/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanobilim ve Nanomühendislik Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof.Dr.Hayrunnisa NADAROĞLU Atatürk Üniversitesi	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Pror.Dr.Ahmet GÜRSERES Atatürk Üniversitesi	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof.Dr. Nurtaç CANPOLAT Atatürk Üniversitesi	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof.Dr. Salih AKPINAR Erzurum Teknik Üniversitesi	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç.Dr.Metin AÇIKYILDIZ Kilis 7 Aralık Üniversitesi	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun/.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

Bu çalışma (örn. BAP, DPT, Tübitak 1001, v.s.) projeleri kapsamında
Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Ahmet GÜRSER danışmanlığında sunulan “KARBONBAZLI REÇİNE ORGANO KİL NANOKOMPOZİTLER İLE URANYUM GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	1	30
Kuramsal Temeller	11	30
Materyal ve Yöntem	7	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	4	20
Sonuç ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	17	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Arvin SEHHATİGDİRİ	Prof. Dr. Ahmet GÜRSER
25.7.2024	25.7.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin belli aşamalardan geçerek bu hale gelmesi ancak hocalarımla yardım ve destekleriyle mümkün olmuştur. Tez konusunun belirlenmesi, çalışmanın yürütülmesi ve yazım aşamasında beni yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet GÜRSES'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam esnasında ve deneysel kısmında yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Demet YILMAZ'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışma esnasında her türlü işlemde yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sayın Elif ŞAHİN'e teşekkür ederim.

Bana daima destek olan, her konuda yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen Nanobilim ve Nanomühendislik ABD sekreteri sayın Abdulmelik KÜÇÜK'e teşekkür ederim.

Her zaman kalbimde yaşatacağım, yanımda olmasa bile hep desteğini hissettiğim, başarıya doğru beni sürekli yönlendiren ve mezuniyetimin hep hayalini kuran, canım anneme tüm kalbimle teşekkür ederim.

Ayrıca her zaman bana destek olan ailem ve akademik hayatımda da bana büyük emekleri olan babama, ağabeyime ve sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Arvin SEHHATİGDİRİ

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KARBONBAZLI REÇİNE ORGANO KİL NANOKOMPOZİTLER İLE URANYUM GİDERİMİNİN ARAŞTIRILMASI

Arvin SEHHATIGDIRI

Danışman: Prof. Dr. Ahmet GÜRSES

Amaç: Uranyum, genellikle çevrede altı değerlikli formda bulunan zararlı bir radyoaktif elementtir ve nükleer endüstriyel faaliyetler aracılığıyla çevreye aşırı miktarda girebilir, bu nedenle uzaklaştırılması zorunlu hale gelmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, Melamin Formaldehit köpük (MFK) ve Melamin formaldehit organo kil nanokompoziti köpük (MFKNKK) ile sulu çözeltilerden U(VI) iyonlarının adsorpsiyonunun adsorpsiyon kapasitesini ve başlangıç uranyum konsantrasyonu, adsorpsiyon süresi, adsorban dozajı, başlangıç pH ve sıcaklık gibi çeşitli değişkenlerin giderim oranı üzerine etkisini incelemektir.

Yöntem: Bu çalışmada, melamin formaldehit köpük (MFK) ve melamin formaldehit organo kil nanokompozit köpük (MFKNKK) gibi iki yeni adsorban, termal işlem ile sertleştirilerek hazırlandı. Hazırlanan adsorbanların yapısal, kristalografik, tekstürel ve yüzey morfolojik karakterizasyonu, FTIR ve XRD gibi spektroskopik ve SEM ve HRTEM gibi mikroskopik teknikler kullanılarak yapıldı. Adsorpsiyon deneyleri gerçekleştirilerek, U(VI)'nin sulu çözeltideki denge konsantrasyonu, UV-Vis spektrofotometrik (433 nm'de) ve radyoaktivite ölçümleri olmak üzere iki farklı yolla belirlendi.

Bulgular: Adsorpsiyon kinetiği ile ilgili sonuçlar, 90 dakikalık bir sürenin adsorpsiyon dengesine ulaşmak için yeterli olduğunu ve verilerin yalancı ikinci derece kinetik model ile uyumlu olduğunu gösterdi. İzoterm analizi, verilerin Tip III izotermi ve Halsey modeli ile uyumlu olduğunu ortaya koydu. Bu uyum, mevcut adsorpsiyon sistemi için elektrostatik ve kompleks oluşumu olmak üzere iki farklı adsorpsiyon mekanizmasını işaret etmektedir. MFK ve MFKNKK için izotermelerde ortaya çıkan, birinci ve ikinci bölgelere göre hesaplanmış adsorpsiyon izosterik entalpi ve entropi değerleri sırasıyla, 3,65 ve -51,02 kJ/mol ve 1,77 ve -67,28 J/mol olarak bulundu.

Sonuç: Deneysel bulgular, hazırlanan MF köpük ve MF kil nanokompozit köpük adsorbanların oldukça etkili olduklarını ve U (VI)'yi sulu çözeltilerden etkili bir şekilde uzaklaştırmak için umut vaat eden bir alternatif sunduklarını göstermektedir. Bu adsorbanların kullanımı ile çevreye zararlı uranyumun etkin bir şekilde uzaklaştırılabileceği tespit edilmiştir. Bu çalışma, nükleer endüstriyel faaliyetlerin çevresel etkilerini azaltmak için kullanılabilecek yeni ve etkili bir yöntem sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Radyoaktif madde, Nanokompozit, Adsorpsiyon, Melamin formaldehit, Adsorban

Temmuz 2024, 98 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

INVESTIGATION OF URANIUM REMOVAL WITH CARBON-BASED RESIN ORGANO CLAY NANOCOMPOSITES

Arvin SEHHATIGDIRI

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet GÜRSES

Purpose: Uranium is a harmful radioactive element typically found in the environment in its hexavalent form and can enter the environment in excessive amounts through nuclear industrial activities, making its removal imperative. The primary aim of this study is to investigate the adsorption of U(VI) ions from aqueous solutions using Melamine Formaldehyde foam (MFF) and Melamine formaldehyde organoclay nanocomposite foam (MFOCNF), examining the effects of various variables such as initial uranium concentration, adsorption time, adsorbent dosage, initial pH, and temperature on the removal efficiency.

Method: In this study, two new adsorbents, Melamine Formaldehyde foam (MFF) and Melamine formaldehyde organoclay nanocomposite foam (MFOCNF), were prepared and hardened by thermal treatment. Structural, crystallographic, textural, and surface morphological characterization of the prepared adsorbents was carried out using spectroscopic techniques like FTIR and XRD, and microscopic techniques like SEM and HRTEM. Adsorption experiments were conducted, and the equilibrium concentration of U(VI) in the aqueous solution was determined using UV-Vis spectrophotometry (at 433 nm) and radioactivity measurements.

Findings: Results related to adsorption kinetics indicated that 90 minutes was sufficient to reach adsorption equilibrium, and the data fit well with the pseudo-second-order kinetic model. Isotherm analysis revealed that the data conformed to the Type III isotherm and the Halsey model. This agreement suggests an adsorption mechanism comprising two regions: electrostatic interaction and complex formation. The calculated adsorption isosteric enthalpy and entropy values for MFF and MFOCNF in the first and second regions were 3.65 and -51.02 kJ/mol, and 1.77 and -67.28 J/mol, respectively.

Results: Experimental findings demonstrated that the prepared MFF and MFOCNF adsorbents were effective and offered promising alternatives for the efficient removal of U(VI) from aqueous solutions. Isotherm analysis results indicated that the adsorption mechanism involved two regions: electrostatic interaction and complex formation, with the transition between these two regions affecting the adsorption capacities. MFF and MFOCNF adsorbents were found to be promising alternatives for the removal of U(VI) ions, effectively eliminating harmful uranium from the environment. This study presents a new and effective method that can be used to mitigate the environmental impacts of nuclear industrial activities.

Keywords: Radioactive substance, Nanocomposite, Adsorption, Melamine formaldehyde, Adsorbent

July 2024, 98 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	5
Uranyum.....	5
Uranyumun Zararları ve Çevresel Etkileri	5
Uranyumun Depolanması ve Güvenliği.....	6
Uranyum Giderme Yöntemleri	6
Kimyasal çöktürme	6
İyon değişimi.....	7
Elektrokinetik ayırma.....	7
Adsorpsiyon	8
Nanokompozitler.....	11
Nanopartiküller	11
Nanopartiküllerin sınıflandırılması	12
Nanosorbentler	14
Yüzey etkileri.....	14
Hacimsel etkileri	15
Polimer-kil Nanokompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	15
Önceki Çalışmalar	17
MATERYAL VE YÖNTEM	24
Materyaller	24
Uranilasetatdihidrat.....	24
Kil.....	25
Melamin	26
Formaldehit	26

Yöntem.....	26
Organo kilin hazırlanması	26
Melamin formaldehit önpolimer (MF) ve MF-organo-kil nanokompozitinin (MFKNK) hazırlanması	27
UV-Vis Spektrofotometre	28
Adsorpsiyon Deneyleri	30
UV-Vis Spektrofotometre ile Konsantrasyon Belirlenmesi.....	32
Zeta Potansiyel Ölçümü	32
Radyoaktivite Ölçümü	33
Radyoaktivite şiddet ölçümü ile konsantrasyon belirlenmesi.....	34
Kullanılmış Radyoaktifin Güvenli Bir Şekilde İmha Edilmesi	35
Enstrümental Analizler	36
FTIR analizi	36
XRD analizi (X-ışını kırınımı).....	37
HRTEM (Yüksek Çözünürlüklü Transmisyon Elektron Mikroskobu).....	38
Adsorpsiyon Süresinin Etkisinin İncelenmesi	38
Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi.....	39
pH Etkisinin İncelenmesi	39
Katı-Sıvı Oranının Etkisinin İncelenmesi	40
ARAŞTIRMA BULGULAR ve TARTIŞMA.....	41
HRTEM Analizi	41
Radyoaktivite Ölçümüne Dayalı Kinetik İncelemeler	43
UV-Vis Spektrofotometre Ölçümlerine Dayalı Kinetik İncelemeler.....	47
Adsorpsiyon İzotermi ve Sıcaklığın Etkisi	56
Adsorpsiyon Termodinamiği	63
pH Etkisi	64
Adsorbent Dozajının Etkisi	68
SONUÇLAR.....	72
KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	84

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Polimer-kil Nanokompozit Teknikleri.....	16
Tablo 2. Montmorillonit (MMT) XRF Kimyasal Bileşimi.....	24
Tablo 3. Hidrokarbon Malzemesinin Bazı Özellikleri.....	27
Tablo 4. MFKNKK Adsorbenti Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar	44
Tablo 5. MFK adsorbenti ile elde edilen veriler	44
Tablo 6. MFKNKK Adsorbentine Ait Kinetik Veriler	48
Tablo 7. MFK Adsorbentine Ait Kinetik Veriler.....	48
Tablo 8. U(VI) adsorpsiyonu için toz MFKNKK üzerinde yalancı birinci derece ve yalancı ikinci derece ve intra partiküler difüzyon kinetik modelleri için hesaplanan kinetik parametreler (25°C, katı/sıvı oranı: 0,1/100 g/mL ve pH: 4,3)	55
Tablo 9. U(VI) adsorpsiyonu için toz MFK üzerinde yalancı birinci derece ve yalancı ikinci derece ve intra partiküler difüzyon modelleri için hesaplanan kinetik parametreler (25°C, katı/sıvı oranı: 0,1/100 g/mL ve pH: 4,3)	55
Tablo 10. MFKNKK Adsorbent İçin Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Veriler	56
Tablo 11. MFK Adsorbent İçin Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Veriler.....	56
Tablo 12. MFKNKK Adsorbenti İçin, Freundlich İzoterm Denkleminin Lineer Denklemi (a), Langmuir Modelinin Lineer Denklemi (b), Brunauer–Emmett–Teller (BET) Modelinin Lineer Denklemi (c), Halsey Modelinin Lineer Denklemi (d), Harkins-Jura Modelinin Lineer Denklemi (e) ve Smith Modelinin Lineer Denklemi (f) İle İlgili İzoterm Sabitleri ve Regresyon Katsayıları	62
Tablo 13. MFK Adsorbenti için, Freundlich İzoterm Denkleminin Lineer Denklemi(a), Langmuir Modelinin Lineer Denklemi (b), Brunauer–Emmett–Teller (BET) Modelinin Lineer Denklemi (c), Halsey Modelinin Lineer Denklemi (d), Harkins-Jura Modelinin Lineer Denklemi (e) ve Smith Modelinin Lineer Denklemi (f) İle İlgili İzoterm Sabitleri ve Regresyon Katsayıları	62
Tablo 14. MFKNKK Adsorbent İçin İzoterm Adsorpsiyon Entalpisi, ΔH°_{ads} , İzoterm Adsorpsiyon Entropisi ΔS°_{ads} Değerleri ve İzoterm Eğrilerindeki İlk ve İkinci Platolara Karşılık Gelen Dağılım Katsayıları	64
Tablo 15. MFK Adsorbent İçin İzoterm Adsorpsiyon Entalpisi, ΔH°_{ads} , İzoterm Adsorpsiyon Entropisi ΔS°_{ads} Değerleri ve İzoterm Eğrilerindeki İlk ve İkinci Platolara Karşılık Gelen Dağılım Katsayıları	64
Tablo 16. MFKNKK Adsorbentine Ait Sonuçlar ($C_b=3000 \mu M$)	65

Tablo 17. MFK Adsorbentine Ait Sonuçlar ($C_b=3000 \mu M$).....	65
Tablo 18. MFKNKK Adsorbenti İçin Katı Sıvı Oranı (Adsorbent Dozajı) Etkininin İncelendiği Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar.....	69
Tablo 19. MFK Adsorbenti İçin Katı Sıvı Oranı (Adsorbent Dozajı) Etkininin İncelendiği Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar.....	69



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Adsorpsiyon türleri, a) Nikel katalizörünün yüzeyinde H ₂ 'nin fiziksel adsorpsiyonu, b) Nikel katalizörünün yüzeyinde H ₂ 'nin kimyasal adsorpsiyonu	9
Şekil 2. Fullerenlerin farklı formları (A) C ₆₀ ve (B) C ₇₀ . (Khan ve diğerleri, 2019)	12
Şekil 3. Grafit katmanının tek duvarlı ve çok duvarlı CNT'lere bükülmesi.....	13
Şekil 4. Uranilasetatdihidrat	24
Şekil 5. Radyasyon kaynaklarının geçirgenlikleri.....	25
Şekil 6. Organo-kil	27
Şekil 7. Hazırlanan MF köpük	28
Şekil 8. Bir UV-Vis spektrofotometresindeki ana bileşenlerin basitleştirilmiş şeması	29
Şekil 9. UV-Vis Spektrofotometresi	29
Şekil 10. pH metre.....	30
Şekil 11. Termostatik çalkalayıcı	30
Şekil 12. Santrifüj cihazı	31
Şekil 13. Süzme ve kurutma aşaması	31
Şekil 14. UV-Vis spektrofotometre kullanarak çizilen kalibrasyon grafiği.....	32
Şekil 15. Zeta metre	33
Şekil 16. Germanium dedektörü.....	34
Şekil 17. Radyoaktivite şiddet ölçümüne dayalı kalibrasyon grafiği.....	35
Şekil 18. FTIR cihazı	37
Şekil 19. XRD cihazı.....	38
Şekil 20. HRTEM cihazı	38
Şekil 21. Farklı sıcaklıklarda yapılan deneyler	39
Şekil 22. Farklı pH'lardaki çözeltiler	40
Şekil 23. a) Melamin formaldehit köpüğü (MFK), b) Melamin formaldehit nanokompozit köpüğü (MFKNKK) için HRTEM Görüntüleri.	41
Şekil 24. Melamin Formaldehit Köpüğü (MFK) ve melamin formaldehit organo kil nanokompozit köpüğünün (MFKNKK) FTIR spektrumları.	42
Şekil 25. Melamin formaldehit köpüğü (MFK) ve melamin formaldehit organo kil nanokompozit köpüğünün (MFKNKK) XRD difraktogramları.....	43
Şekil 26. U (VI)'nin gama spektrumu.....	44
Şekil 27. Başlangıç U(VI) konsantrasyonu fonksiyonu olarak adsorbe edilen miktarın adsorpsiyon zamanına bağlı grafiği. a) MFKNKK adsorbent b) MFK adsorbent ..	45

Şekil 28. Denge süresindeki konsantrasyona karşı şiddet a) MFKNKK adsorbenti b) MFK adsorbenti	46
Şekil 29. Başlangıç U(VI) konsantrasyonu fonksiyonu olarak adsorbe edilen miktarın adsorpsiyon zamanına bağlı grafiği. a) MFKNKK b) MFK	49
Şekil 30. Başlangıç U(VI) konsantrasyonu ile uzaklaştırma oranının değişimi. a) MFKNKK b) MFK	50
Şekil 31. Deneysel verilerin (a) Yalancı birinci derece MFKNKK için, (b) Yalancı ikinci derece MFKNKK için ve (c) MFKNKK için intra partiküler difüzyon. (d) Yalancı birinci derece MFK için, (e) Yalancı ikinci derece MFK için ve (f) MFK için intra partiküler difüzyon modellerine uygunluğu için çizilen grafikler	53
Şekil 32. Üç farklı sıcaklıktaki (25, 45 ve 65°C) deneysel adsorpsiyon izotermi (süre: 90 dk; katı/sıvı oranı: 0,1/100 g/mL, çalkalama hızı: 150 dk ⁻¹ ve doğal pH: 4,3). a) MFKNKK adsorbenti için, b) MFK adsorbenti için	57
Şekil 33. MFKNKK için Freundlich izoterm denkleminde (a), Langmuir modeline (b), Brunauer–Emmett–Teller (BET) modeline (c), Halsey modeline (d), Harkins-Jura modeline (e) ve Smith modeline(f) ait izotermi	60
Şekil 34. MFK için Freundlich izoterm denkleminde (a), Langmuir modeline (b), Brunauer–Emmett–Teller (BET) modeline (c), Halsey modeline (d), Harkins-Jura modeline (e) ve Smith modeline(f) ait izotermi	61
Şekil 35. MFKNKK adsorbenti için, (a) başlangıç pH'sına bağlı olarak adsorplanan miktarın ve zeta potansiyel değerlerinin değişimi ve (b) başlangıç pH'sına bağlı olarak adsorplanan miktarın ve elektriksel iletkenlik değerlerinin değişimi (Başlangıç konsantrasyonu: 1200 µM, sıcaklık: 25°C, süre: 90 dk, katı/sıvı oranı: 0,1g/100 mL ve çalkalama hızı: 150 dk ⁻¹).....	66
Şekil 36. MFK adsorbenti için(a) başlangıç pH'sına bağlı olarak adsorplanan miktarın ve zeta potansiyel değerlerinin değişimi ve (b) başlangıç pH'sına bağlı olarak adsorplanan miktarın ve elektriksel iletkenlik değerlerinin değişimi (Başlangıç konsantrasyonu: 1200 µM, sıcaklık: 25°C, süre: 90 dk, katı/sıvı oranı: 0,1g/100 mL ve çalkalama hızı: 150 dk ⁻¹).....	67
Şekil 37. Adsorbent dozuyla U (VI)'nin adsorplanan miktarının değişimi a) MFKNKK adsorbenti b) MFK adsorbenti (başlangıç konsantrasyonu: 1200 µM, sıcaklık: 25°C, süre: 90 dk, doğal pH: 4,3 ve çalkalama hızı: 150 dk ⁻¹).....	70

Şekil 38. Adsorbent dozuyla U(VI)'nin giderim yüzdesinin değişimi a) MFKNKK adsorbenti	
b) MFK adsorbenti (başlangıç konsantrasyonu: 1200 µM, sıcaklık: 25°C, süre: 90 dakika, doğal pH: 4,3 ve çalkalama hızı: 150 dk ⁻¹)	71



GİRİŞ

Yaygın bir radyonüklid olan uranyum, nükleer yakıtın yanması, cevher madenciliği, doğal yatakların liç edilmesi ve toprağın ve yeraltı suyunun fosfatlı gübrelerle kirlenmesi gibi çeşitli kanallar yoluyla çevreye salınır ve genellikle çevrede altı değerlikli formda bulunur. Uranyumdan yayılan alfa radyasyonu cilde nüfuz edemese de kan dolaşımına giren çok küçük miktardaki uranyum, biyolojik olarak birikme eğilimi gösterir ve kemik dokularında uzun yıllar kalır, bu da organizmaların arızalanmasına ve hatta bazı durumlarda ölüme neden olur. Sonuç olarak, sudaki uranyumun varlığı yüksek toksik tehlike olarak bilinmektedir. ABD Çevre Koruma Ajansı, içme suyundaki uranyum için maksimum kirletici seviyesini (MCL) 30µg/L olarak belirlemiştir (Zaran, 2019). Nükleer endüstriyel faaliyetler yoluyla çevreye aşırı miktarda girebilen uranyumun erişim sularından uzaklaştırılması bir zorunluluk haline gelmiştir.

Çözünmüş uranyumun yüksek seviyelerde bulunduğu atıkların oluşması ve yayılması genellikle toprakları ve su rezervuarlarını kirletir. Ancak, sıkıştırılmış bentonit dolgu gibi çeşitli bariyer sistemleri kullanılarak yeraltı suyunu uzun süreler boyunca korumak mümkündür (Dinis ve diğerleri 2021). Bu bariyer sistemleri, suya erişimi azaltmak veya tamamen engellemek için jeoteknik ve jeolojik bariyerler olarak hizmet verir. Kil mineralleri, yüksek adsorpsiyon kapasitesi, şişme özellikleri ve düşük su geçirgenliği ile bilinen malzemeler olduğu için bu tür bariyerler için uygun olarak kabul edilir (Sellin ve diğerleri 2013). İllit, montmorillonit ve illit/montmorillonit karışımları, kilaşı kayaçlarının ana bileşenlerini oluşturur (Schnurr ve diğerleri 2015, Bradbury ve diğerleri 2013). Uranyumun doğal deniz suyu, nehir suyu, durgun su ve endüstriyel atıksulardan geri kazanılması, öncelikli bir araştırma alanıdır (Abney ve diğerleri 2017). Dünya genelinde ele alınan nükleer atık yönetimi stratejisinin ana amaçlarından biri, tuz kubbesi, kristalin kayaçlar ve kil kayaçlarının nükleer atık depolama için potansiyel alanlar olarak belirlendiği derin jeolojik formasyonlarda depolanmalarını içerir (Tsang ve diğerleri 2005). Ancak, kil kayacının kullanıldığı nükleer atık depolama alanında, aktinidlerin ve fisyon ürünlerinin radyoaktif bozunması, atık konteynerlerine yaklaşık 100 °C'ye kadar yüksek sıcaklık artışlarına yol açabilir (Johnson ve diğerleri 2002, JosepH ve diğerleri 2013).

Uranyumun yeraltı su tabakaları, topraklar ve kaya oluşumları içindeki taşınım mekanizmalarını ve radyoaktif kirletici miktarlarını belirlemek, sistemin jeokimyasal yapısını

ve özellikle adsorpsiyon, birleşme ve çöktürme gibi detaylı radionüklit tutma mekanizmalarını anlamayı gerektirir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA), içme suyundaki maksimum uranyum konsantrasyonu için sırasıyla 0.015 ve 0.030 mg/L'lik sınırlama değerleri önermektedir (Keith ve diğerleri 2022). Radyoaktif kirlenici maddelerin tutma kapasitesi, büyük ölçüde adsorpsiyon/desorpsiyon davranışlarına bağlıdır (Fernandes ve diğerleri 2012). Uranyumun yer değiştirmesini geçici depolama, atık işleme ve kirlenmiş arazi yönetimi açısından kontrol etmek, uranyumun güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi ve nükleer tesis operasyonlarını desteklemek oldukça önemlidir. Karbon bazlı malzemeler, yüksek termal ve radyasyon dirençleri sayesinde uranyumu sulu çözeltilerden çıkarmak ve geri kazanmak için katı faz çıkarma tekniklerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Belloni ve diğerleri 2009). Aynı zamanda, organik değişim reçineleri ve çeşitli anorganik adsorbanlar da sıkça kullanılan malzemeler arasındadır. Yüksek özgül yüzey alanına ve adsorpsiyon kapasitesine sahip olan karbon fiber, homojen gözenek boyutları ve mekanik dayanıklılığına ek olarak yüksek elektronik ve termal iletkenliğe sahiptir. Grafen ise mükemmel mekanik dayanıklılığa, ultra hafifliğe ve geniş özgül yüzey alanına sahiptir; ayrıca bazal düzlemi, karbonil, karboksil, epoksit ve hidroksil grupları ile modifiye edilmiş grafen oksit gibi çeşitli şekillerde karşımıza çıkar. Bu malzemeler, adsorban olarak büyük ilgi görmektedir (Lian ve diğerleri 2010, Chen ve diğerleri 2013).

Radyoaktif atıklardan uranyumun uzaklaştırılması ve geri kazanılması için en umut verici ayırma teknolojilerinden biri olarak bilinen katı faz ekstraksiyonu (SPE), ekonomiklik ile emülsiyon içermeme gibi avantajlara sahip olan bir yöntemdir ve bu alanda büyük ilgi görmektedir. Karbon nanotüpleri (CNT'ler), yoğun ilgi görmelerinin nedeni olan yüksek termal ve radyasyon direnci, yüksek asit-baz stabilitesi ve büyük özgül yüzey alanı gibi avantajları ile çeşitli katı faz ekstraktanlar arasında öne çıkar (İbrahim ve diğerleri 2016, Mishra ve diğerleri 2022, Wang ve diğerleri 2014, Xue ve diğerleri 2019). Ancak, CNT partiküllerinin hidrofobik olmaları nedeniyle sulu çözeltilerde kolayca agregasyona uğramaları, etkili adsorpsiyon davranışını engelleyebilir ve adsorpsiyon kapasitesinde azalmaya neden olabilir. Bu sebeple, CNT'lere çeşitli hidrofilik fonksiyonel gruplar ekleyerek dispersiyon özellikleri ve adsorpsiyon performansları artırılabilir (Tsang ve diğerleri 2005, Johnson ve diğerleri 2002, Xue ve diğerleri 2019). Amberlit reçineli sulu sistemlerde uranyum davranışını ve katı fazdaki adsorpsiyonunu inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Radyonüklid retansiyonunu etkileyen temel süreçler, katı/su arayüzünde emilim ve çökelmedir, bu süreçlerin detaylı bir şekilde nicel, kinetik ve termodinamik perspektiften incelenmesi gereklidir (Samuel Shaw 2022, Sadeghi 2008, Metwally 2005). Radyoaktif iyonları atıksulardan uzaklaştırmak için kimyasal çöktürme, sıvı-sıvı ekstraksiyon, nano-ultra filtrasyon, membran ayırma, iyon değişimi, elektro-depozisyon,

katı faz ekstraksiyon, elektro diyaliz, fotokataliz ve adsorpsiyon gibi çeşitli işlemler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Zhang 2019, Peng 2020, Aly 2013, Fomina 2014, Michard 1996, Tsuruta 2002, Mirjalili 2007, Singh 2009). Adsorpsiyon, radyoaktif iyonları sulu çözeltilerden uzaklaştırmanın en popüler ve en kolay yöntemlerinden birisidir. Bu nedenle endüstriyel atıklardan uranyumun uzaklaştırılmasında yaygın bir şekilde uygulanmaktadır (Nakajima 1999). Çeşitli doğal adsorbanlar ve iyon değişim reçineleri üzerinde uranyum adsorpsiyonu, radyoaktif atıkların arıtılması, ekonomik, çevresel ve bertaraf açısından önemlidir (Rahmati 2012).

Anyon değişim reçineleri, özellikle madencilik endüstrisinde, özellikle liç sıvısından uranyumun başarılı bir şekilde geri kazanımında kullanılmıştır. Ayrıca, aktif karbon, zeolitler, immobilize siloksan polimerleri, doğal ve modifiye kil ve sentetik anyon değişim reçineleri de geniş bir kullanım alanına sahiptir (Hritcu 2012). Kil mineralleri, özellikle bentonit, yüksek seviyeli radyoaktif atık depolarını doldurmak ve kapatmak için özellikle tercih edilen bir malzeme olarak ön plana çıkar. İllit ve montmorillonit gibi 2:1 tip kil mineralleri, TOT (tetrahedral-oktahedral-tetrahedral) katmanlarının tekrarlandığı, kafes içinde izomorfik kaymalara sahip ve kalıcı bir negatif şarj içeren tabakalı alumino-silikatlerdir. Bu mineraller, büyük yüzey alanları ve güçlü adsorpsiyon kapasiteleri ile bu tür kullanımlar için popülerdir (Fernandes 2015). Montmorillonit, kalıcı negatif yüklü bazal düzlemler ve kenar düzlemlerde amfotetik hidroksil grupları ile karakterize edilir. Düşük pH'da çoğunlukla dış küre modunda kation değişimi yoluyla bazal düzlemlere bağlanma yeteneği ve yüksek pH'da kenarlarda iç küre kompleksleşme yeteneği nedeniyle, lantanit/aktinit kationları için çok uygun bir adsorbent olarak bilinir (Chen ve diğerleri, 2015). Çeşitli radyonüklitlerin kil mineralleri ile etkileşimlerini açıklamak için sıkça başvurulmuş bir model, Bradbury ve Baeyens tarafından geliştirilen bir yarı mekanik iki alanlı protoliz, non-elektrostatik yüzey kompleksleşme ve kation değişim modelidir. Bu model, geniş bir pH aralığında uranyumun adsorpsiyon izoterm verilerini başarıyla açıklamak için kullanılmıştır. Oksidatif koşullar altında, uranyum genellikle altı değerlikli bir oksidasyon durumunda bulunan uranil iyonu, UO_2^{+2} 'ye dönüşür ve yeraltı sularında bulunan birçok ligand ile yüksek çözünürlükte sulu kompleksler oluşturabilir. Özellikle yüzey ve derin yeraltı sularında yaygın olan çözünmüş karbonat, U(VI) ile güçlü sulu komplekslerin oluşmasına neden olabilir (Guillaumont 2003). Bu tür komplekslerin oluşumu, adsorpsiyonun azalmasına ve dolayısıyla U(VI) göç hızlarının artmasına neden olabilir. Adsorpsiyon süreçlerinin geniş bir koşul yelpazesi altında detaylı bir şekilde anlaşılması, adsorpsiyon modellerinin geliştirilmesi açısından son derece önemlidir. Uranilin adsorpsiyon davranışını açıklamak için özellikle montmorillonit üzerinde geliştirilen çeşitli yüzey kompleksleşme modelleri, makroskobik adsorpsiyon deneylerine dayanmaktadır (Bradbury

2005). Düşük iyonik mertebelerde, uranilin özellikle pH 5'in altında, arakatman içi katyon değişim sitelerine ve bu pH'dan yüksekçe yüklü olan kenar sitelerine (silanol ve/veya luminol) öncelikle adsorbe olacağı öne sürülmüştür. Yüksek iyonik mertebelerde ise, katyon değişiminin güçlü bir şekilde azalacağı ve adsorpsiyonun pH 5'ten sonraki aşamada temel olarak montmorillonit kenar bölgelerinde meydana geleceği tahmin edilmiştir (Bachmaf 2008). Karbonatın varlığında, U(VI) adsorpsiyonu montmorillonit ve bentonit üzerinde araştırılmış ve pH'nın 6,5'ten büyük olduğu değerlerde gözlemlenen keskin azalmalar, negatif yüklü uranil-karbonat komplekslerinin oluşumuyla açıklanmıştır (Catalano 2005). pH ve U(VI) yüküne bağlı olarak, kil minerallerinin kenar bölgelerinde meydana gelen dış küre kompleksleşme, yani katyon değişimi, iç küre kompleksleşmeden ayırt edilebilir. Polisakkaritler gibi doğal polimerler, özellikle sulardan ağır metallerin uzaklaştırılmasında mükemmel potansiyel göstermiş ve düşük maliyetleri, yaygınlıkları ve hidroksil, amino ve diğer bileşiklerin varlığı nedeniyle avantajlıdır (JosepH 2019). Atık su arıtımındaki mevcut geleneksel yöntemlere ek olarak, selüloz, kitosan, kitin, nişasta ve bazı sentetik polimerler gibi polimerleşmiş biyomalzemeler kullanılarak yapılan adsorpsiyon işlemi giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Singh 2021). Melamin formaldehit, yaygın bir sentetik polimerdir ve yapısal olarak değişim reçinelerine benzer. Pozitif yüklü uranyum iyonlarını sulu çözeltiden uzaklaştırmada yüksek adsorpsiyon potansiyeli sunar (Wei 2016). Ayrıca, nano dolgu maddeleri kullanarak nano kompozitler elde edilerek yüzey alanı ve yüzeydeki oksijen ve azo gruplarının sayısı artırılabilir. Nano dolgu maddelerini polimer matrise eklemenin, polimer özelliklerini geliştirmek için güçlü bir araç olduğu bilinmektedir (Rudresh 2019). Özellikle 2:1 tabakalı bir yapıya sahip olan bentonit, yüksek iyon değişim kapasitesi ve yüksek özgü yüzey alanı nedeniyle organo kil hazırlamak için geniş bir şekilde kullanılan kil türlerinden biridir. Yüzeyi surfaktanlar ekleyerek veya aşılama ile modifiye ederek, nanoparçacıklara dönüşme potansiyeline sahip organo kil elde edilebilir (Morreale 2015).

Bu çalışmanın biricil yeniliği, melamin formaldehit organo kil nanokompozitin sentezi ve karakterizasyonu, aynı zamanda uranyumu sulu çözeltiden uzaklaştırmada yeni bir adsorbent olarak uygulanabilirliğinin incelenmesidir.

Bu araştırmada, melamin formaldehit köpük (MFK) ve melamin formaldehit organo kil nanokompoziti (MFKNKK), U (VI)'yi uzaklaştırmak için yeni bir düşük maliyetli ve umut vadeden katı adsorbentlar olarak hazırlandı ve sulu çözeltiden U (VI)'nin adsorpsiyon performansı incelendi. Ayrıca, adsorpsiyon süresi, başlangıç pH, adsorbent dozu ve sıcaklık gibi değişkenler deneysel parametreler olarak seçildi.

KURAMSAL TEMELLER

Uranyum

Uranyum, atom numarası 92 olan ve "U" ile sembolize edilen, doğal olarak oluşan bir kimyasal, radyoaktif ve yoğunluğu yüksek elementtir. Uranyum üç farklı allotropu bulunur ve zayıf manyetik özelliklere sahiptir (Chu, 2012). Uranyum mineralleri arasında uraninit, otunit, torbernit ve koffinit bulunmaktadır. Uranyum nükleer santrallerde yakıt olarak kullanılır ve cam renklendirme, nükleer yakıt üretimi, uçak kanadı balastları ve zırh kaplamaları gibi başka uygulamaları da vardır. Uranyum elde etmek için KUF₅ ve UF₄ gibi bileşikler elektrolize edilir (Chu, 2012).

Uranyumun Zararları ve Çevresel Etkileri

Uranyum, doğada bulunan bir radyoaktif elementtir ve çevresel etkileri konusunda bazı endişeleri beraberinde getirebilir. Uranyumun zararları ve çevresel etkileri hakkında bazı önemli noktalar aşağıda verilmiştir:

- Uranyum, radyoaktif bir element olduğu için çevredeki canlılara ve çevreye zararlı olabilir. Radyoaktif bozunma sonucunda alfa, beta ve gama ışınları yayabilir. Bu ışınlar, insan sağlığına ve doğal yaşam sistemlerine zarar verebilir.
- Uranyum, yer altı ve yer üstü su kaynaklarında bulunabilir. Eğer uranyum, su kaynaklarında yüksek seviyelerde bulunursa, içme suyu ve sulama suyu kalitesini olumsuz etkileyebilir. Bu da insan sağlığı ve bitki örtüsü için potansiyel bir risk oluşturabilir.
- Uranyum, canlı organizmalar için toksik olabilir. Özellikle uzun süreli maruziyet durumunda böbrek hasarı, kanser, doğum kusurları ve diğer sağlık sorunlarına neden olabilir. Bu nedenle, uranyumun doğal yaşam sistemlerine yayılmasını önlemek önemlidir.
- Uranyum, nükleer enerji üretimi için kullanılan bir yakıttır. Nükleer enerji santralleri, uranyum kullanarak elektrik üretirken çevreye radyoaktif atıklar bırakabilir. Bu atıkların doğru şekilde depolanması ve yönetilmesi önemlidir, aksi takdirde çevresel etkilere neden olabilirler.
- Uranyum, nükleer silahların yapımında da kullanılabilir. Nükleer silah kullanımı, büyük çaplı ölüm ve yıkıma neden olan korkunç sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle,

uranyumun kontrol altında tutulması ve nükleer silah yayılmasının engellenmesi uluslararası önem taşır.

Bu nedenlerle, uranyumun çevresel etkileri ve zararlarına karşı dikkatli olunmalı ve uygun önlemler alınmalıdır. Uluslararası standartlar ve düzenlemeler, uranyumun etkilerini en aza indirmek ve insan sağlığını korumak için önemli bir rol oynamaktadır.

Uranyumun Depolanması ve Güvenliği

Uranyumun depolanması ve güvenliği, nükleer enerji endüstrisinde büyük bir öneme sahiptir. Uranyum, doğal olarak radyoaktif bir element olduğundan, doğru şekilde depolanması ve kontrolü büyük bir özen gerektirir. Uranyumun depolanması için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında uranyum cevherinin yer altında depolanması, zenginleştirilmiş uranyumun koruyucu kaplarda saklanması ve kullanılmış nükleer yakıtın güvenli bir şekilde depolanması bulunur. Bu depolama tesisleri, sızıntıları önlemek, radyasyon yayılmasını sınırlamak ve çevreyi korumak için sıkı güvenlik önlemleriyle donatılmalıdır.

Uranyumun güvenliği, uluslararası standartlar ve düzenlemelerle sağlanır. Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı (IAEA) gibi kuruluşlar, uranyumun güvenli depolanması ve kullanımı için rehberlik sağlar. Bu standartlar, uranyumun yetkisiz kullanımını engellemek, çalıntı veya terörist saldırı risklerini azaltmak ve nükleer silah yapımını önlemek amacıyla uygulanır. Uranyumun güvenli depolanması, nükleer enerji tesislerinin ve nükleer materyal tedarik zincirinin tamamında büyük bir öncelik olarak kabul edilmektedir. Çalışanlar, eğitimli ve deneyimli olmalıdır ve tesisler, güvenlik sistemleri, sızdırmazlık önlemleri ve radyasyon monitörleme cihazları ile donatılmalıdır.

Sonuç olarak, uranyumun depolanması ve güvenliği, nükleer enerji endüstrisi için kritik bir konudur. Uluslararası standartlara ve düzenlemelere uyulması, uranyumun potansiyel tehlikelerini minimize etmek ve çevre üzerindeki etkisini en aza indirmek için hayati önem taşır. Bu şekilde, nükleer enerjinin potansiyelinden yararlanırken güvenlik ve çevresel koruma sağlanabilir.

Uranyum Giderme Yöntemleri

Uranyum giderme yöntemleri, uranyumun çevreden uzaklaştırılması veya azaltılması için kullanılan çeşitli teknikleri içerir.

Kimyasal çöktürme

Bu yöntem genellikle uranyumu sudan veya toprak matrisinden ayırmak için kullanılan etkili bir yöntemdir. Çöktürme yönteminde uranyum, suya veya toprağa karışan diğer

bileşiklerden ayrılmak üzere suya çözünen bileşiklerle reaksiyona girer ve çöker. Bu, uranyumun sudan veya topraktan ayrılmasını sağlar. Ancak, bu yöntemin maliyeti, atık üretimi ve kimyasal atıkların etkin bir şekilde yönetimi gibi dezavantajları da vardır. Bu nedenle, belirli bir uygulama için en uygun yöntemi belirlemek için dikkatli bir analiz ve değerlendirme yapılması gerekmektedir. (Dinçer ve diğerleri, 2015)

İyon değişimi

İyon değişimi (IE), uranyumu atıksulardan çekici bir yöntemdir ve aynı zamanda negatif çevresel etkiyi azaltır (Chen, 2022). İyon değişimi, uranyumu su matrisinden almak için özel reçinelerin kullanılmasını içerir (Rosenberg, 2016). Güçlü bazik anyonik reçineler, suyu uranyumdan etkili bir şekilde arındırmak için kullanılabilir (DeSilva, 2005). Klorür formunda çalışan poröz bir anyon reçinesi, düşük seviyelerdeki uranyumu etkili bir şekilde gidermek için kullanılabilir. İyon değişimi yöntemi, uranyumun su matrisinden ayrılmasını sağlayarak etkili bir şekilde uranyum giderimi sağlar. Ancak, işletim maliyetleri ve kimyasal atık yönetimi gibi çevresel ve ekonomik zorluklar da dikkate alınmalıdır (DeSilva, 2005). İyon değişimi yöntemi, uranyumun sudan uzaklaştırılması için etkili bir seçenek olabilir, ancak belirli bir uygulama için en uygun yöntemi belirlemek için dikkatli bir analiz ve değerlendirme yapılması gerekmektedir (Rosenberg, 2016).

Elektrokinetik ayırma

Bu yöntemde, elektrik alanının kullanılmasıyla uranyumun adsorbentın yüzeyinden uzaklaştırılması hedeflenir. Elektrokinetik ayırma yöntemi, bir elektrot sistemi kullanarak uranyumun iyonik formda hareket etmesini sağlar. Bu yöntemde, uranyumlu çözelti bir elektrot üzerine uygulanır ve elektrik alan ile taşınması sağlanır. Bu süreçte uranyum iyonları anot veya katot yüzeyine adsorbe olabilir. Daha sonra, elektrot üzerine adsorbe olan uranyum iyonları çözeltiden uzaklaştırılır. Elektrokinetik ayırma yöntemi, diğer yöntemlere kıyasla bazı avantajlara sahiptir. Öncelikle, bu yöntem düşük maliyetlidir ve atık üretimi azdır. Ayrıca, uranyumun adsorbent yüzeyine tutunması daha verimli olabilir, bu da daha yüksek verimlilik sağlar. Bununla birlikte, elektrokinetik ayırma yöntemi, elektrot sistemleri ve elektrik enerjisi gerektirdiği için uygulaması daha karmaşık olabilir. Dezavantajları olarak, enerji tüketimi, operasyonel karmaşıklık, elektrot yüzeyi kirlenmesi, ilk yatırım maliyetinin yüksekliği sıralanabilir. Yani, elektrik alanı oluşturmak için enerji gerektirir. Bu, işlem maliyetini ve enerji tüketimini artırabilir. Ayrıca elektrot yerleşimi, elektrik alanının uygulanması ve uranyumun toplanması gibi bir dizi karmaşık işlem içerir. Bu nedenle, operasyonel olarak karmaşık olabilir. İlk yatırım maliyeti yüksek olabilir. Elektrot sistemleri, kontrol sistemleri ve analiz ekipmanları

gibi bileşenlerin maliyeti göz önüne alınmalıdır. Elektrotlar üzerinde biriken uranyum, zamanla elektrot yüzeyini kirlenmesine neden olabilir. Bu durum, sürekli olarak temizlik ve bakım gerektirebilir.

Adsorpsiyon

Bu yöntemde, adsorbent olarak adlandırılan bir malzeme kullanılır. Adsorbent, uranyum iyonlarını çekerek veya tutarak onları sudan veya topraktan ayırır. Adsorpsiyon yöntemi, uranyum giderme için etkili bir seçenek olabilir. Bu yöntem, su arıtma tesislerinde veya nükleer atık depolama alanlarında kullanılabilir. Adsorpsiyon malzemeleri genellikle özel kaplamalar veya reçineler şeklinde kullanılır. Uranyum adsorpsiyonu için kullanılan başlıca malzemeler arasında aktif karbon, zeolit ve reçineler bulunur. Bu malzemeler, uranyum iyonlarını kendilerine bağlayarak sudan veya topraktan uzaklaştırır. Adsorpsiyon yöntemi, su veya toprak matrisinden uranyumu ayırırken bir dizi faktöre bağlı olarak etkinliği değişebilir. Bu faktörler arasında, pH, sıcaklık, uranyum konsantrasyonu ve adsorbent malzemenin özellikleri yer alır.

Adsorpsiyon prosesinin özellikleri

Fiziksel, kimyasal ve biyolojik sistemlerde uygulanabilir. Gaz ve sıvı sistemlerde arıtma için endüstriyel olarak da kullanılabilir. Ayrıca su ve kanalizasyon arıtma sistemlerinde ve hava kirliliğinin giderilmesinde kullanılır. Bir maddenin adsorpsiyon gücü, aşağıdaki faktörlerin bir fonksiyonudur (Babich 2003, Yang 2003):

- Temas yüzeyi

Temas yüzeyi arttıkça adsorpsiyon miktarı da artar. En iyi adsorbentler ince taneciklere sahip olan veya başka bir deyişle daha yüksek temas yüzeyine sahip olan malzemelerdir.

- Yoğunluk

Adsorbentın birim kütlesi başına hacmini ifade eder. Yoğunluk gözenekliliğin bir fonksiyonudur.

- Sıcaklık

Adsorpsiyona kimyasal bir reaksiyon eşlik etmedikçe, sıcaklığın arttırılması genellikle adsorpsiyonu azaltır.

- Adsorbent ve adsorbat maddenin türü

Adsorbat ve adsorbent materyallerin adsorpsiyon olayı üzerinde etkisi vardır, bu nedenle bazı adsorbentlar belirli bir çözünmüş materyale kıyasla yüksek adsorpsiyon gücü gösterirken, bazıları diğer materyallerden daha az adsorpsiyon gücüne sahiptir.

- Adsorbent ve absorbat malzemenin durumu

Adsorbat ve adsorbent malzemenin durumu, kimyasal reaksiyonla ilişkisi, reaksiyonlarının tersinirliği veya tersinmezliği de adsorpsiyonu etkiler.

Yüzey adsorpsiyon türleri

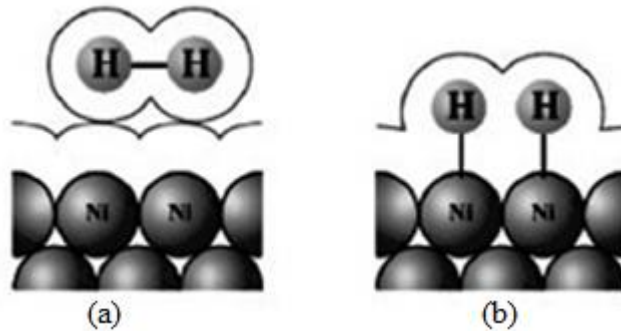
- **Fiziksel adsorpsiyon**

Katı moleküller ve madde arasında fiziksel adsorpsiyon çekim kuvvetlerinin sonucu olan tersine çevrilebilir bir olgudur. Moleküller arasında çeşitli iç kuvvetler vardır ve bu kuvvetlerden biri van der Waals'tır. Bu, iki molekülü birbirine çeken çok zayıf bir kuvvettir. Ancak bu kuvvet, elektron alışverişini ve kimyasal bağların oluşumunu içermez. Örneğin, bir katı ile gaz arasındaki çekim kuvveti, gaz molekülleri arasındaki kuvvetten daha büyük olduğunda, gaz, katı yüzeyinde yoğunlaşır. Adsorplanan malzeme katı kristal kafese nüfuz etmez veya çözülmez, ancak yüzeyde kalır. Bununla birlikte, katının çok fazla gözenekliliği ve kılcal boşlukları varsa ve adsorbe edilen malzeme katıyı ıslatırsa adsorpsiyon etkili demektir.

- **Kimyasal adsorpsiyon**

Kimyasal adsorpsiyon veya aktif adsorpsiyon, adsorban ve adsorbe edilen malzeme arasında kimyasal etkileşimlerin etkili olmasıyla meydana gelir. Ortaya çıkan kimyasal bağlanmanın gücü, şartlara göre önemli ölçüde değişir ancak bağlanmama kuvvetleri genellikle fiziksel adsorpsiyonda mevcut olandan daha büyüktür. Bağlanma kuvveti fiziksel bağlanmanın yaklaşık 100 katıdır. Kimyasal adsorpsiyon sırasında açığa çıkan ısı, genellikle kimyasal reaksiyonunki kadar yüksektir. Süreç genellikle dönüşümsüzdür.

Kimyasal ve fiziksel adsorpsiyon için iki tipik örnek için şematik gösterim, Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Adsorpsiyon türleri, a) Nikel katalizörünün yüzeyinde H₂'nin fiziksel adsorpsiyonu, b) Nikel katalizörünün yüzeyinde H₂'nin kimyasal adsorpsiyonu

- **Fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon farklılıkları (Jeon, 2009)**

- Fiziksel adsorpsiyonda zayıf van der Waals kuvvetleri adsorpsiyona neden olurken, kimyasal adsorpsiyonda kimyasal bağlar adsorpsiyona neden olur.
- Fiziksel adsorpsiyon entalpisi, kimyasal adsorpsiyon entalpisinden daha küçüktür.
- Fiziksel adsorpsiyon, adsorbatın kaynama noktasının altında gerçekleşir, ancak kimyasal adsorpsiyonda, daha yüksek sıcaklıklarda da adsorpsiyon meydana gelebilir.
- Fiziksel adsorpsiyonda, adsorplanan maddenin artan miktarı ile birim alan başına adsorpsiyon miktarı artar, ancak kimyasal adsorpsiyonda adsorbe edilen maddenin artan miktarı ile adsorpsiyon miktarı aynı oranda artmayabilir.
- Fiziksel adsorpsiyonda adsorpsiyon miktarı adsorbe edilecek maddenin özelliklerinden biri iken, kimyasal adsorpsiyonda adsorpsiyon miktarı heriki maddenin özelliklerinden biridir.
- Aktivasyon enerjisi, fiziksel yüzey adsorpsiyonunda yer almazken, kimyasal adsorpsiyonda yer alabilir.
- Fiziksel adsorpsiyon birkaç katmanda gerçekleşir, ancak kimyasal adsorpsiyon maksimum bir katmanla sonuçlanır.

Adsorpsiyonun diğer ayırma yöntemlerine göre avantajları ve uygulamaları

Adsorpsiyon, kullanımı giderek artan ayırma yöntemlerinden biridir. Bu ayırma yönteminin diğer ayırma yöntemlerine göre avantajları şunlardır (Jeon,2009):

- Daha düşük işletme maliyetine sahiptir.
- Genel olarak, bu ayırma işlemi için ekipmanın boyutları diğer ayırma yöntemlerine kıyasla çok daha küçüktür.
- Sabit yüzeylerde adsorpsiyon işlemlerinin çalışmasının kontrolü, ilk olarak hareketli fazlardan sadece biri olduğu için diğer ayırma işlemlerine göre daha kolaydır.
- Çözücü ekstraksiyonu gibi bazı ayırma yöntemlerinden farklı olarak, sabit substratlarda adsorpsiyon yöntemi doğrudan bir ayırma yöntemidir, yani ayırma için ek bir tamamlayıcı işlem gerekli değildir.

Uranyum giderimi, su arıtma ve nükleer enerji üretimi gibi çeşitli endüstrilerde önemli bir konudur. Yüksek adsorpsiyon özellikleri nedeniyle düşük maliyetli bentonit nanokompozitleri gibi nanoadsorbentların kullanımı, su kaynaklarından uranyumu etkili bir şekilde uzaklaştırmak için umut verici sonuçlar göstermiştir (Zeynab F.Akl, 2021). Bu yenilikçi

nanokompozitler, endüstriyel süreçlerden ve su kaynaklarından uranyumu güvenli ve etkili bir şekilde uzaklaştırma potansiyeli sunmaktadır.

Nanokompozitler

Nanokompozitler, benzersiz özellikler sergileyen hibrit bir malzeme oluşturmak için nanomalzemelerin diğer malzemelerle birleştirilmesiyle oluşturulan bir malzeme sınıfıdır. Nanomalzemeler, en az bir boyutu nanometre (1-100 nanometre) aralığında olan ve doğası gereği metalik, seramik veya polimerik olabilen malzemelerdir. Nanokompozitlerin özellikleri hem nanomalzemenin hem de matris malzemesinin özelliklerinden etkilenir. Nanokompozitler matris malzemesine göre üç tipe ayrılabilir: metal matris, seramik matris ve polimer matris nanokompozitler. Nanokompozitlerde nanopartiküllerin kullanılması mekanik, elektriksel, manyetik, optik ve termal özelliklerde önemli gelişmelere yol açmaktadır. Ancak nanokompozitlerin çevresel etkileri, güvenlik kaygıları ve dezavantajları da dikkate alınmalıdır.

Nanopartiküller

Nanoteknoloji geçen yüzyıldan beri bilinen bir araştırma alanıdır. Nobel ödüllü Richard P. Feynman'ın 1959'da verdiği meşhur "There's Plenty of Room at the Bottom" (Feynman, 1960) konferansında "nanoteknoloji"yi ortaya koymasından bu yana, nanoteknoloji alanında çeşitli devrim niteliğinde gelişmeler yaşandı. Nanoteknoloji, nano ölçekte çeşitli türde malzemeler üretti. Nanopartiküller (NP'ler), bir boyutu en az 100 nm'den küçük olan partikül maddeler içeren geniş bir malzeme sınıfıdır (Laurent ve diğerleri, 2008). Bu malzemelerin önemi, araştırmacıların büyüklüğün bir maddenin fizikokimyasal özelliklerini etkileyebileceğini keşfetmesiyle ortaya çıktı. Örneğin, optik özellikler açısından, 20 nm'lik altın (Au), platin (Pt), gümüş (Ag) ve paladyum (Pd) nanopartikülleri sırasıyla karakteristik şarap kırmızısı rengi, sarımsı gri, siyah ve koyu siyah renklere sahiptir. Optik özelliklerinin, görünür bölgedeki emilim nedeniyle farklı renkler veren boyuta bağlı olduğu bildirilmektedir.

Nano partikülleri, boyutları 1-100 nm arasında değişen küçük malzemelerdir. Özelliklerine, şekillerine veya boyutlarına göre farklı sınıflara ayrılabilirler. Farklı gruplar arasında fullerenerler, metal nanopartiküller, seramik nanopartiküller ve polimerik nanopartiküller bulunur. Nanopartiküller, yüksek yüzey alanı ve nano ölçekli boyutları nedeniyle benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Reaktiviteleri, dayanıklılıkları ve diğer özellikleri aynı zamanda benzersiz boyutlarına, şekillerine ve yapılarına da bağlıdır. Bu özellikleri nedeniyle kataliz, görüntüleme, tıbbi uygulamalar, enerji bazlı araştırmalar ve çevresel uygulamaları içeren çeşitli ticari ve evsel uygulamalar için uygun adaylardır. Kurşun, cıva ve kalaydan oluşan ağır metal nanopartiküllerin çok sert ve stabil olduğu, bozunmasının

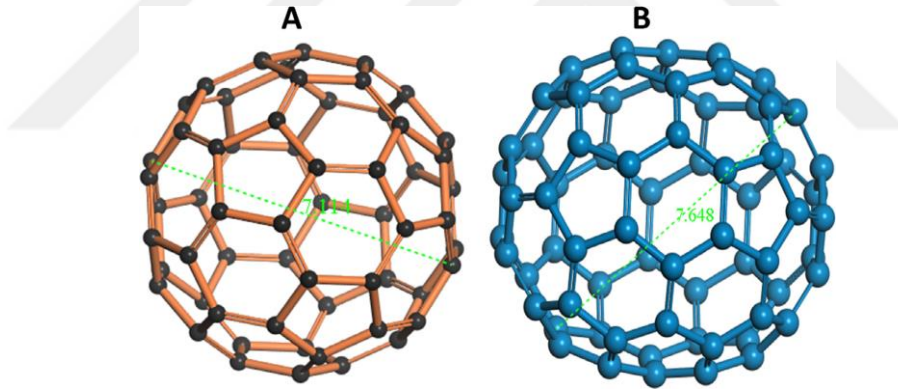
kolaylıkla sağlanamadığı ve bunun da birçok çevresel toksisiteye yol açabileceği bildirilmektedir (Khan, 2019).

Nanopartiküllerin sınıflandırılması

Nanopartiküller morfolojilerine, boyutlarına ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak genel olarak çeşitli kategorilere ayrılır. Fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre iyi bilinen nanopartikül sınıflarından bazıları aşağıda verilmiştir (Khan ve diğerleri, 2019).

Karbon bazlı nanopartiküller

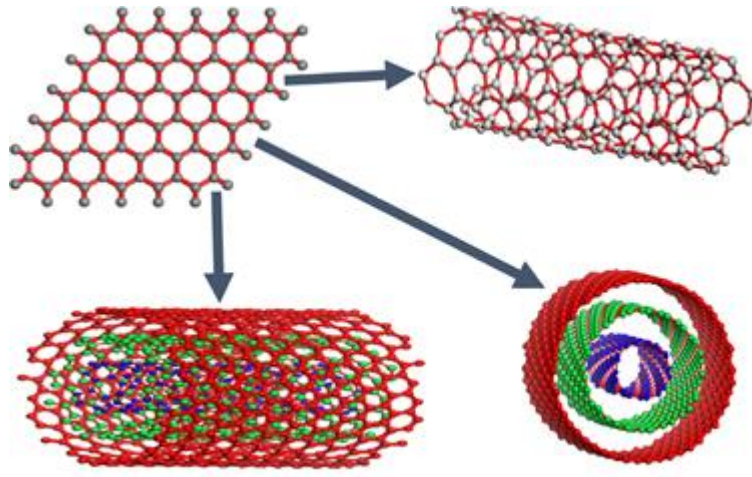
Fullerenler ve karbon nanotüpler (CNT'ler), karbon bazlı nanopartiküllerin iki ana sınıfını temsil eder. Fullerenler, karbonun allotropik formları gibi küresel içi boş kafesten yapılmış nanomateryal içerir. Elektrik iletkenliği, yüksek mukavemeti, yapısı, elektron ilgisi ve çok yönlülüğü nedeniyle, nanopartiküller kayda değer bir ticari ilgi yaratmıştır (Astefanei ve diğerleri, 2015). Bu malzemeler düzenlenmiş beşgen ve altıgen karbon birimlerine sahiptir ve her karbon sp^2 hibritleşmesi sergilemiştir. Şekil 2, sırasıyla 7.1 ve 7.6 nm çapında C_{60} ve C_{70} 'den oluşan iyi bilinen fullerenlerden bazılarını göstermektedir.



Şekil 2. Fullerenlerin farklı formları (A) C_{60} ve (B) C_{70} . (Khan ve diğerleri, 2019)

Nanopartiküller uzun, boru şeklinde bir yapıya sahiptir ve 1-2 nm çapındadır (İbrahim, 2013). Bunlar, metalik veya yarı iletken olarak davranabilmektedirler (Aqel ve diğerleri, 2012). Yapısal olarak bükülmüş grafit levhaya benzemektedir (Şekil 3).

Levhalar tek, çift veya çok duvarlı olabileceğinden sırasıyla tek duvarlı (SWNT), çift duvarlı (DWNT) veya çok duvarlı karbon nanotüpler (MWNT) olarak adlandırılmaktadır. Grafitten lazerle veya elektrik arkıyla buharlaştırılan karbon öncüllerinin, yaygın olarak özellikle de atomik karbonların metal parçacıkları üzerine biriktirilmesiyle sentezlenirler (Elliott ve diğerleri, 2013)



Şekil 3. Grafit katmanının tek duvarlı ve çok duvarlı CNT'lere bükülmesi

Metal nanopartiküller

Metal nanopartiküller tamamen metal öncüllerinden yapılıdır. İyi bilinen lokalize yüzey plazmon rezonansı (LSPR) özellikleri nedeniyle, bu nanopartiküller benzersiz optoelektrik özellikleri vardır. Alkali ve soy metallerin nanopartikülleri, yani Cu, Ag ve Au, elektromanyetik spektrumunun görünür bölgesinde geniş bir soğurma bandına sahiptir (Dreaden ve diğerleri, 2012).

Seramik nanopartiküller

Seramik nanopartiküller, ısı ve ardışık soğutma yoluyla sentezlenen inorganik metalik olmayan katılardır. Amorf, polikristalin, yoğun, gözenekli veya içi boş formlarda bulunabilirler (Sigmund ve diğerleri, 2006). Bu nedenle bu nanopartiküller kataliz, fotokataliz, boyaların fotodegradasyonu ve görüntüleme uygulamaları gibi uygulamalarda kullanılmaları nedeniyle araştırmacıların büyük ilgisini çekmektedir. (Thomas ve diğerleri, 2015).

Yarı iletken nanopartiküller

Yarı iletken malzemeler metaller ve ametaller arasında özelliklere sahiptir ve bu özelliğinden dolayı çeşitli uygulama alanları bulmuşlardır (Ali shahid ve diğerleri, 2017). Yarıiletken nanopartiküller geniş bant aralıklarına sahiptir ve bu nedenle bant aralığı ayarlamasıyla özelliklerinde önemli değişiklikler gösterebilirler. Bu nedenle fotokatalizde, fotooptikte ve elektronik cihazlarda kullanılan çok önemli malzemelerdir (Sun, 2000).

Polimerik nanopartiküller

Bunlar normalde organik bazlı nanopartiküllerdir ve bunun için özel bir terim olan polimer nanopartikül (PNP) topluluğu kullanılmaktadır. Çoğunlukla nanosfer veya nanokapsüler şekillidirler (Mansha ve diğerleri, 2017). Genellikle katı olan matris parçacıklar

olup, diğer moleküllerin küresel yüzeyinde dış sınırında adsorbe edilirler. İkinci olarak, katı kütle tamamen parçacık içinde kapsülendir (Rao ve Geckeler, 2011). Polimer nanopartiküller, biyomedikal uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örneğin, ilaç taşıyıcı sistemler olarak kullanılmaları, ilaçların kontrollü ve hedeflenmiş salınımını sağlayarak tedavi etkinliğini artırmaktadır (Kaur ve diğerleri, 2016). Ayrıca, görüntüleme ve teşhis amaçlı olarak da polimer nanopartiküller kullanılmaktadır. Özellikle, manyetik ve floresan özelliklere sahip nanopartiküller, kanser gibi hastalıkların erken teşhisinde önemli rol oynayabilir (Prados ve diğerleri, 2012).

Polimer nanopartiküller, anti-kanser ilaçları gibi terapötik ajanların taşınmasında kullanılmıştır. Örneğin, doksorubisin yüklü polimerik nanokapsüller, kanser hücrelerine hedefli bir şekilde ilaç taşıyabilmektedir (Prados ve diğerleri, 2012). Ayrıca görüntüleme ve teşhis için de kullanılmışlardır ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) için kullanılan demir oksit nanopartikülleri, hedef hücrelerde birikerek daha net görüntüler elde edilmesine yardımcı olmaktadır (Lee ve diğerleri, 2012).

Lipid bazlı nanopartiküller

Bu nanopartiküller lipid kısımlar içermekte ve birçok biyomedikal uygulamada etkin olarak kullanılmaktadır. Genel olarak, bir lipid nanopartikül karakteristik olarak küreseldir ve çapı 10 ila 1000 nm arasında değişir. Polimerik nanopartiküller gibi, lipid nanopartiküller de lipidden yapılmış katı bir çekirdeğe sahiptir ve bir matris, çözünabilir lipofilik moleküller içerir.

Nanosorbentler

Nanomalzemeler, kimyasal ve fiziksel özelliklerde bir takım benzersiz özelliklere sahiptir. Bunların en önemlisi, nanosorbent yüzeyi olarak, birçok metal iyonunun atomları tarafından yüksek kimyasal aktivite ve adsorpsiyon kapasitesi sergilemeleridir. Yüzey atomları reaktiftir ve bu nedenle diğer iyon elementleriyle statik elektriklerle birleşir. Nanomalzemeler, eser metaller ve polar organik bileşikler dahil olmak üzere çok çeşitli malzemeleri yüksek oranda adsorplayabilir. Nano ölçeğe indirgenmiş malzemeler, aşağıdaki iki etki dahil olmak üzere nadir çeşitli özellikler sergileyebilir (Topsøe, 1996):

Yüzey etkileri

- İç atomlara kıyasla daha fazla yüzey atomuna sahip olmak, belirleyici yüzey etkilerine yol açar.
- Yüzey alanındaki bu artış ve yüzey atomlarındaki artış, parçacıkların karşısındaki enerji düzeyini artırır.

- Bir nanomalzemenin yüzey alanını arttırmak kimyasal reaksiyonları hızlandırır.

Hacimsel etkileri

- Daha yüksek enerji ile sonuçlanan daha düşük dalga boyu ve daha yüksek frekans
- Işık absorpsiyon spektrumu için uygun olan atomların mavi rengi.
- Paramanyetizma son derece üstündür ve parçacıklar, maddenin manyetik alanından daha küçük olduğunda olur.
- Ortalama enerji arttıkça, yakın mesafedeki atom sayısı azalır, bu da nanoparçacıklardaki katalizörlerin özelliklerini iyileştirir.

Boyut özelliklerine ilişkin bilgi çalışmaları, parçacıkların özelliklerinin önemli ölçüde değiştiği ve iki kısma ayrıldığı yaklaşık 30 nm'lik kritik bir parçacık boyutu olduğu sonucuna varmıştır. Yoğun olmayan nanomalzemeler, nano yapıli malzemelerin aksine, homojen bir kaplama (vakum, gaz, sıvı veya katı bileşenler) içerir. Yoğun bir nanotelin boyutları, 10 nanometreden nanometrenin onda bir kısmına kadar değişebilir. Nanomalzemeler esas olarak bağımlı grupların adsorpsiyonundaki rollerine, yüzeylerinin ve dış nanoparçacıkların, nanoparçacıklarının içsel özelliklerine bağlıdır (Topsøe, 1996).

Polimer-kil Nanokompozitlerin Üretim Yöntemleri

Nanokompozitler genellikle üç farklı yöntemle üretilir: in-situ polimerizasyon, eriyik halde interkalsyon (melt intercalation) ve çözelti halinde (solution exfoliation) ekfoliasyon üretim teknikleri. Bu yöntemlerin ortak hedefi, kil nanopartiküllerinin polimer matrisi içinde homojen bir dispersiyonunu sağlamak, yani kil partiküllerini tek tabakalara ayırmaktır.

İn-situ (eş zamanlı) polimerizasyon yönteminde, kil tabakaları monomer içinde iyice dispers hale getirilir ve ardından polimerizasyon reaksiyonu başlatılır. Monomer içinde kil tabakaları bir miktar şişer ve iyi bir dispersiyon için yardımcı kimyasal maddeler kullanılır. Elde edilen polimer istenilen şekle sokulur. Bu yöntemle elde edilen nanokompozitler, kil nanopartiküllerinin iyi bir şekilde dispers olduğu ve nanokil tabakalarının birbirinden ayrıldığı eksfoliye bir yapıya sahiptir. Ancak, bu yöntemin başlangıç maliyeti yüksektir.

Çözelti halinde eksfoliasyon yönteminde, polimer bir çözücü içinde çözünür, ardından organokil eklenir ve kil tabakaları homojen bir dispersiyon oluşturacak şekilde karıştırılır. Oluşan polimer zincirleri tabakalar arasına kolayca girer ve nano seviyede dispersiyon sağlar. Sonrasında çözücü uzaklaştırılır. Bu yöntemle elde edilen polimer-kil kompozitleri genellikle eksfoliye yapıdadır. Ancak, çözelti maliyetleri yüksek olabilir ve bu, ticarileşmeyi zorlaştırabilir.

Eriyik halinde interkalasyon yönteminde, nanokil partikülleri önce hazırlanmış polimer eriyiği içine katılır ve ardından karıştırılır. Bu yöntem, yatırım maliyeti en düşük olandır ve mevcut teknoloji ile polimer-kil nanokompozitlerin üretimi mümkündür. Ancak, kil partiküllerinin polimer matrisi içinde kısa sürede homojen bir dispersiyon sağlanması zor olabilir. Polimerin kil ile iyi bir afinitesi yoksa, nanokillerin homojen bir şekilde dispers olması zorlaşabilir. Bu yöntemle üretilen polimer-kil kompozitleri hem aralanmış (interkale) hem de dağılmış (eksfoliye) yapıya sahip olabilir. Ayrıca, bu yöntem endüstriyel üretim için maliyeti en düşük olanıdır, ancak kil partiküllerinin polimer matrisi içinde hızla homojen bir dispersiyon sağlanması gibi önemli bir zorlukla karşılaşabilir. Tablo 1’de üretim teknikleri, avantaj ve dezavantajlar örnekleriyle sunulmuştur.

Tablo 1. Polimer-kil Nanokompozit Teknikleri (Zeng ve diğerleri, 2005)

Üretim tekniği	Dispersiyonda etkili kuvvetler	Avantajlar	Dezavantajlar	Örnekler
İn-situ (Eş Zamanlı) Polimer-izasyon	Monomer ve kil yüzeyi arasındaki etkileşim kuvveti. Monomerlerin tabakalar arasında polimerizasyonu sırasında oluşan entalpi değişimleri	Az veya hiç uyumlu olmayan polimerler için uygundur. Genellikle termoset polimerler için bu yöntem kullanılır	Kil eksfoliasyonu monomerin tabakalar arasına difüzyonu ve tabakaların genişlemesine bağlıdır. Polimerizasyon tamamlanmayabilir ve oligomer oluşu olabilir	Naylon 6, epoxy, poliüretan, polistiren, polietilen oksit, doymamış poliester, polietilen tereftalat
Çözültiden harmanlama	Çözücü uzaklaşırken entropik serbestlik oluşmaktadır ve bu da tabakalar arasına girmiş olan polimerin konformasyon entropisinin kısıtlanmasıyla dengelenmektedir.	Genellikle suda çözünen polimerler tercih edilir	Çok yüksek miktarda çözücü gereksinimi; Çözücü ve polimer için bir kointerkalasyon söz konusu olabilir. Bazı durumlarda polimer-kil nanokompozit oluşumu için uygun çözücü bulunmayabilir.	epoxy, poliimid, polietilen, polimetilmetakrilat
Eriyikten harmanlama	Polimer-kil etkileşimin oluşturduğu entalpik katkı	Çevreci bir yöntemdir. Çözücüye gerek yoktur. Konvansiyonel üretim teknikleri ile üretilebilir; ekstrüzyon veya kalıplama.	Polimer zincirlerin kil tabakalarının arasına girmesi için zaman ihtiyaç vardır. Çok yavaş gerçekleştiği için genellikle kısmen eksfoliye yapı oluşur.	Naylon 6, polistiren, polietilen tereftalat

Polimer-kil nanokompozitlerinin üretimi, katıdan interkalasyon, ko-vulkanizasyon ve sol-jel gibi alternatif yöntemlerle de gerçekleştirilebilmektedir, bu da malzemenin özelliklerini çeşitlendirmek ve optimize etmek için farklı yaklaşımların benimsenebileceği anlamına gelir (Patel ve diğerleri, 2006).

Önceki Çalışmalar

El-Maghrabi ve diğerleri (2017) Manyetik grafen bazlı ferberit nanokompozit basit, düşük maliyetli olan mikrodalga-destekli yöntemle sentezlediler. Hazırlanan nanokompozitler, sulu çözeltiden uranyum iyonlarının temizlenmesi için yeni bir adsorbent olarak tanıtıldı. Deneysel veriler umut verici bir adsorpsiyon kapasitesi göstermektedir. Özellikle oda sıcaklığında 60 dakika içinde %90,5 adsorpsiyon verimliliği ile maksimum 455 mg/g değeri elde edildi. Kinetik ve izoterm adsorpsiyon verileri sırasıyla yalancı ikinci dereceden model ve Langmuir denklemiyle donatıldı. Son olarak, tasarlanan nanokompozitlerin ana morfolojileri ve adsorpsiyon kapasitelerinin tam olarak korunmasıyla birlikte büyük bir sürdürülebilirliğe (5 kattan fazla vurgunculuk) sahip olduğu bulundu.

Tan ve diğerleri (2015) çalışmalarında, hiyerarşik üç boyutlu bir kompozitin (katmanlı çift hidroksit/grafen) üretimi için kolay bir yol sunmaktadır. Kompozit, katmanlı çift hidroksit (LDH) nano tabaka dizilerinin grafen tabakaları üzerinde yerinde büyütülmesi yoluyla elde edildi. Sonuçlar, katmanlı çift hidroksit/grafenin uranyuma (VI) karşı maksimum adsorpsiyon kapasitesinin 277,80 mg/g olduğunu ve uranyumun (VI) sulu çözeltiden uzaklaştırılmasında yüksek verimlilik sergilediğini ortaya koymaktadır. ΔH° , ΔS° ve ΔG° gibi termodinamik parametreler sürecin endotermik ve kendiliğinden olduğunu göstermektedir. Kinetik adsorpsiyon, yalancı ikinci dereceden hız denklemi ile açıklanabilir. Bu çalışma, uranyumun (VI) sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için etkili, hızlı ve kullanışlı bir yaklaşımı açıklamaktadır.

Zare ve diğerleri (2015) tarafından yürütülen çalışmada, gümüş hidroksit nanopartikülleri (AgOH-NP'ler) çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT'ler) üzerine verimli bir şekilde yerleştirilmiştir. Bu nanomaterial kombinasyonu, radyoaktif uranyumun (VI) çıkarılması ve ardından setil trimetil amonyum bromür (CTAB) varlığında eriokrom siyanin R ile kompleksleştirilmesi için kullanılmıştır. Adsorpsiyon süreci ve kütle transferi, ultrason dalgaları kullanılarak hızlandırılmış ve desteklenmiştir. AgOH-NP'ler-MWCNT'ler, geniş bir yüzey alanına sahip olmaları nedeniyle UO_2^{+2} iyonunun niteliksel ve niceliksel olarak uzaklaştırılması için uygun bir malzeme olarak belirlenmiştir. UO_2^{+2} iyon adsorpsiyonunun, yalancı ikinci dereceden hız denklemi ve parçacık içi difüzyon modelinin bir kombinasyonunu izlediği belirlenmiştir. Denge verileri Freundlich modeli ile uyumlu olup, küçük miktarlarda (5

mg) AgOH-NP'ler-MWCNT'lerin yüksek miktarda UO_2^{+2} iyonunu (%96'dan fazla giderim) uzaklaştırma kapasitesine sahip olduğunu ve bu kapasitenin 140 mg g^{-1} adsorpsiyon kapasitesine kadar yeterli olduğunu göstermektedir. Bu etki, 10 dakikalık temas süresinde gözlemlenmiştir.

Zahran ve diğerleri (2019), β -siklodekstrin manyetik bentonit nanokompoziti yeşil, düşük maliyetli ve endüstriyel olarak etkili bir yöntemle üretmiştir. Hazırlanan nanokompozitler, uranyum iyonlarının sulu çözeltiden uzaklaştırılması için adsorbent olarak kullanıldı. Tasarlanan nanoadsorbent için deneysel sonuçlar umut verici bir adsorpsiyon kapasitesi göstermektedir. Özellikle, oda sıcaklığında 60 dakika içerisinde %61'lik adsorpsiyon verimliliği ile maksimum 305 mg/g değeri kaydedildi. Kinetik ve adsorpsiyon izoterm verilerinin sırasıyla yalancı ikinci derece modele ve Langmuir denkleminde uyduğu bulundu. Son olarak, tasarlanan düşük maliyetli nanoadsorbent iyi derecede sürdürülebilirliğe sahiptir ve toksik radyonüklidler içeren atık suyun endüstriyel arıtımında potansiyel bir uygulamaya sahip olabilir.

Police ve diğerleri (2020), Düşük maliyetli adsorbentların U'yu sudan uzaklaştırmadaki etkinliğini araştırmak için bir çalışma yaptılar. Uçucu kül (FA) ve çay atıklarının (TW) daha iyi uzaklaştırma verimliliğine sahip olduğu bulunan yedi adsorbent, U giderim verimliliği açısından tarandı. Katı-sıvı temas süresi ve çözelti pH'sı, daha iyi U uzaklaştırma verimliliğine yönelik koşulları oluşturmak üzere optimize edildi. FA ve TW üzerindeki U adsorpsiyonu, sırasıyla $4,63 \text{ g/mg/dk}$ ve $15,63 \text{ g/mg/dk}$ hız sabit değerleriyle yalancı ikinci dereceden kinetiği takip etti. FA ve TW, sırasıyla pH 6 ve pH 4'te en yüksek U giderme kapasitesine sahipti. U sorpsiyon verileri Freundlich ve Dubinin-Radushkevich izoterm modelleriyle donatıldı. FA ve TW üzerindeki U adsorpsiyonunun, ortalama serbest enerji (E) değerleri 8 kJ/mol 'den düşük olan fiziksel bir süreç olduğu bulunmuştur. Teorik olarak hesaplanan maksimum adsorpsiyon kapasitesi değerleri, FA'nın TW'ye göre daha iyi bir adsorbent olduğunu göstermektedir ve bu deneysel olarak da doğrulanmıştır. Her iki adsorbent üzerindeki U adsorpsiyonu, test edilen U konsantrasyonlarında Ca^{+2} 'dan müdahaleye sahiptir ve Fe^{+3} 'dan müdahale yoktur. Ayrıca FA ve TW'nin, katkılı gerçek yeraltı suyu örneklerinden dünya sağlık örgütü sınırının altına kadar U'yu arındırmada etkili olduğu da bulunmuştur.

Elwakeel ve diğerleri (2014), kitosan manyetit varlığında glutaraldehit kullanılarak çapraz bağlanmışlardır. Reçine, amin içeren kitosan üretmek üzere tetraetilenpentamin (TEPA) ile reaksiyona sokularak kimyasal olarak değiştirildi. Reçine, UO_2^{+2} iyonlarının sulu ortamdan alınmasına karşı daha yüksek bir afinite gösterdi ve maksimum emme kapasitesi, pH 4 ve 25

$^{\circ}\text{C}$ 'de $1,8 \text{ mmol g}^{-1}$ 'e ulaştı. Yüklenen reçineden UO_2^{+2} 'nin desorbe edilmesi için hidroklorik asit ($0,5 \text{ M}$) kullanıldı ve %98 gibi yüksek bir desorpsiyon verimi elde edildi.

Lin ve diğeri (2021), film benzeri bir kitin/polietilenimin biyosorbenti (CH-PEI) hazırlandı ve uranil-karbonat bileşiklerinin sudan uzaklaştırılmasında kullandılar. Sonuçlar, biyosorbentin benzersiz hiyerarşik gözenekli bir yapıya ve yüksek nitrojen içeriğine sahip olduğunu gösterdi. Toplu deneyler, $\text{pH} = 6$ 'da maksimum adsorpsiyon kapasitesini elde ettiğini gösterdi. Özellikle CH-PEI, 50 mg/L 'lik başlangıç konsantrasyonunda 4 saat içinde sorpsiyon dengesine ulaşabildi. Maksimum adsorpsiyon kapasitesi, 50 mg/L ve 300 mg/L başlangıç konsantrasyonlarında $247,04 \text{ mg/g}$ ve $1023,74 \text{ mg/g}$ olmuştur. Kinetik ve izoterm verileri yalancı ikinci dereceden ve Langmuir modelleri ile iyi bir şekilde uyum sağlamıştır. Simüle edilen yeraltı suyundaki uranyumun %98,9'unu giderebilir. Düşük maliyetleri, yüksek verimliliği ve kolay toplanması göz önüne alındığında CH-PEI, yer altı suyundan uranyumun uzaklaştırılması için umut verici bir biyosorbent olacaktır. Bu çalışma, kitin bazlı adsorbentlar kullanılarak uranyumun uzaklaştırılması için potansiyel bir teknik sunmaktadır.

Wang ve diğeri (2011) uranyumun sulu çözeltiden uzaklaştırılması için bir yöntem geliştirilmesine odaklandılar. Uranyum iyonlarını sulu çözeltiden uzaklaştırmak için kitosan ve demir iyonları birlikte kullanıldı. İki aşamalı pH ayarlaması yoluyla, kesikli sistemler kullanılarak kitosan ve demir iyonlarının sulu çözeltide uranyuma karşı alım davranışı farklı deney koşullarında incelenmiştir. Deney sonuçları, uranyumun kitosan ve demir iyonlarının sinerjik etkisi ile uzaklaştırılmasının, uranyum iyonlarının tek başına kitosan tarafından adsorbe edilmesinden daha etkili olduğunu göstermiştir. Kitosanın ve demir iyonlarının adsorpsiyon, koaservasyon ve birlikte çöktürme dahil sinerjik etkisi, uranyumun yüksek uzaklaştırma oranından sorumluydu.

Ahmad ve diğeri (2022) çalışmasında, deniz suyundan U(VI) 'nin verimli adsorpsiyonu için kitosan (Cs) işlevselleştirilmiş boru şeklinde karbon nanokompozit mikroküreleri (CsFTnCM) hazırlamak için tek adımlı bir işlem geliştdi. Bu sayede hazırlanan adsorbentin (CsFTnCM2) deniz suyundan %99,5 oranında uranyum (VI) absorbe ettiğİ bulunmuştur. Bu tip adsorbentin deniz suyundan $0,660 \text{ (mg/g)}$ uranyum (VI) yükleme kapasitesi vardı. Adsorpsiyon kinetiğİ yalnızca adsorbentin fiziksel yapısına değıl aynı zamanda Cs matrisindeki FT'nin oranına da bağılıdır. Ancak U(VI) 'nin alım kinetiğİ, artan FT'nin içeriğİyle birlikte belirli bir dereceye kadar arttı. Deniz suyuna maruz kalan adsorbentlardan U(VI) giderimi araştırıldı ve sonuçlar, Na_2CO_3 kullanılarak bulunan adsorbentlardan U(VI) şeridinin etkili olduğunu gösterdi.

Huang ve diğeri (2023), etkili ve seçici uranyum adsorpsiyonu için bir polietilenimin-kitosan n-PEI/ECH-CTS kompozit mikrosferi ($n = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) sentezledi. 0.4-PEI/ECH-CTS mikroküreleri yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olup yedi döngüden sonra hâlâ %95'in üzerinde adsorpsiyon verimliliğini korumaktadır. Bu mikroküreler, 10,98 mg/L'den 1 µg/L'ye kadar CU(VI) konsantrasyonunu düşürerek ABD EPA'nın içme suyu için belirlediği uranyum sınırının oldukça altında kaliteli bir şekilde çalışır. Endüstriyel uygulamalar için bu mikrokürelerin maliyet-etkinliği ve pratikliği vurgulanmaktadır.

Yuşan (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, uranyumun sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için ham ve asit ile modifiye edilmiş diatomit kullanılmıştır. Çalışmada diatomit örneklerinin karakterizasyonu SEM, XRD ve TGA/DTA analiz teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Adsorpsiyon kinetiği üç farklı konsantrasyonla incelenmiş ve adsorpsiyon sürecinin hem ham hem de asit ile modifiye edilmiş diatomit için yalancı ikinci mertebe kimyasal adsorpsiyonu izlediği bulunmuştur. Ayrıca, sıcaklığın adsorpsiyon üzerindeki etkisi incelenmiş ve termodinamik parametreler hesaplanmıştır. Pozitif entalpi değerleri, adsorpsiyon sürecinin endotermik olduğunu gösterirken, negatif serbest enerji değişimi, adsorpsiyon sürecinin incelenen sıcaklıklarda kendiliğinden gerçekleştiğini göstermektedir. Entropi değerlerinin pozitif olması, adsorpsiyon sürecinde katı/çözelti arayüzeyinde rastgele bağlanmanın arttığını göstermektedir.

Zhang ve diğeri (2023) çalışmasında, Yeni bir kitosan bazlı kompozit olan BC@CSPTI, biyokömürün kitosan ve polietilenimin çapraz bağlı ağ yapısına eşit şekilde dağıtılmasıyla sol-jel teknolojisi yöntemiyle sentezlenmiştir. Bu kompozit, uranyum (VI) için yüksek bir adsorpsiyon verimliliği (%96,7) sağlamaktadır ve diğer kitosan bazlı adsorbentlerden çok daha yüksek bir statik doymuş adsorpsiyon kapasitesine (633,4 mg/g) sahiptir. BC@CSPTI, çözünebilir U (VI)'yı dünya sağlık örgütünün izin verilen sınırlarını karşılayacak şekilde tamamen uzaklaştırabilecek kadar etkilidir. Bu kompozit, farklı su kütlelerinde yüksek adsorpsiyon verimlilikleri göstermektedir ve çeşitli gerçek su ortamlarında uygulanabilirliğe sahiptir. BC@CSPTI, iyi bir stabiliteye sahiptir ve üç boyutlu iç içe geçen bir ağ yapısıyla uranyum (VI) gideriminde bol miktarda aktif bölge sunar. Bu nedenle, BC@CSPTI gibi kitosan bazlı adsorbentler, ağır metallerin kirlenmiş suyu temizleme konusunda potansiyel uygulamalara sahiptir ve maliyet etkin ve çevre dostu bir çözüm sunar.

Xia ve diğeri (2023) çalışmasında fitik asit (PCG) içeren yenilikçi bir kitosan/grafen oksit kompoziti, sulu çözeltilerden U(VI) uzaklaştırılması için hammadde olarak grafen oksit, kitosan ve fitik asit kullanılarak tek bir hidrotermal reaksiyonla doğrudan üretildi. Sonuçlar, fitik asit molekülündeki hidroksil grubu ile kitosandaki amino grubu arasındaki kimyasal

bağdan elde edilen PCG'nin, pulsu yüzey gözenekli yapısına, iyi termal stabiliteye ve U (VI)'a karşı güçlü şelatlama yeteneğine sahip olduğunu gösterdi. PCG'nin U(VI) için adsorpsiyon süreci, Langmuir izotermal ve yalancı ikinci dereceden kinetik modelleriyle tutarlıydı ve maksimum adsorpsiyon kapasitesi, pH 5,0'da 325,56 mg/g'ye ulaşabildi. Sentezlenen PCG, PCG üzerindeki hem hidroksil gruplarının hem de fosfat gruplarının U(VI) ile güçlü şelatlanması nedeniyle daha yüksek adsorpsiyon seçiciliği sergiledi.

Zhimin Lv ve diğerleri (2019) bir MgO /karbon adsorbentı, tek aşamalı Mg- MOF-74 pirolizasyon hidrotermal kalsinasyon yöntemiyle hazırlayıp, sulu çözeltiden U(VI)'nın uzaklaştırılması için kullandılar. Karakteristik sonuçlar, hazırlanan kompozitin tipik bir gözenekli yapı olduğunu gösterdi. Sonuçlar, MgO/karbonun U (VI)'yı etkili ve hızlı bir şekilde giderebildiğini ve bildirilen diğer adsorbent materyallerden çok daha yüksek olan mükemmel bir adsorpsiyon kapasitesi (777,51 mg/g) gösterdiğini gösterdi. Ek olarak, MgO/karbonun U(VI)'ya karşı adsorpsiyon kapasitesi, geniş spesifik yüzey alanı ve iyi tanımlanmış gözenekli yapı tarafından büyük ölçüde desteklenir. Zeta potansiyeli ve XPS analizine dayanarak, U(VI)'nın giderilmesine yönelik olası mekanizma, yüzey kompleksleşmesini ve elektrostatik çekimi içeriyordu. Sonuçlar, MgO/karbonun çok geniş bir uygulama beklentisi olan atık sudan U(VI) giderimi için etkili bir adsorbent olarak kabul edilebileceğini göstermektedir.

Basu ve diğerleri (2017) yeni bir sorbent, kitosan emdirilmiş kalsiyum aljinat (Cal-Alg-Chi) boncuk, su kalitesi parametrelerinden ödün vermeden içme suyundan uranyumun emilmesi için sentezlendi. Toplu modda alım çalışması, 0,1–50 $\mu\text{g mL}^{-1}$ konsantrasyon aralığında %98'den fazla uranyum emilimi gösterdi. Cal-Alg-Chi boncukları, Hindistan'ın etkilenen bölgelerinden toplanan yeraltı suyundaki uranyum konsantrasyonunu 15 ng mL^{-1} 'in altına, 100'den 450 ng mL^{-1} 'e düşürdü. Sorpsiyon izotermi Langmuir modelini takip ederek maksimum sorpsiyon kapasitesi 36,04 mg g^{-1} olarak değerlendirildi. Sorpsiyon, ΔG^0 değeri -9,76 kJ mol^{-1} ile endotermikti ve kinetik, yalancı ikinci dereceden hız yasasını takip etti.

Liu ve diğerleri (2022) araştırmalarında kitosan/grafen oksit (CS/GO) elektrotları, U(VI)'nın sulu çözeltiden etkili elektrosorpsiyonu için nano-imalatlanmıştır. CS/GO malzemelerinin spesifik kapasitansını belirlemek için döngüsel voltametri ölçümleri yapıldı. U(VI) elektrosorpsiyonu kapasitif deiyonizasyon (CDI) sistemi üzerinde gerçekleştirildi. Sonuçlar, CS/GO-4'ün çeşitli CS/GO malzemeleri arasında U(VI) için en iyi elektrosorpsiyon performansını sunduğunu gösterdi; bu, iyon transferini teşvik etmek için iyi dengelenmiş bir mezo-/mikro-gözenekli yapı ve iyon yakalama için üstün iletkenlik ile ilişkilidir. İzoterm, Langmuir modeliyle elektriksel çift katmanlı etkileşim yoluyla tanımlanabilirken kinetik, Langmuir modeliyle uyandırılabilir. CS/GO-4 tarafından U(VI) elektrosorpsiyonuna yönelik

maksimum giderme kapasitesi, 0,9 V'de 271,2 mg/g'ye ulaştı; bu, 0,0 V'de elde edilenin neredeyse iki katıydı. Elektrosorpsiyon mekanizması, elektriksel çift tabakanın oluşumunu ve U(VI)'nın CS/GO malzemelerinin âmin ve karboksil grupları tarafından koordinasyonunu içerebilir. Elektrosorpsiyon-desorpsiyon döngüleri ayrıca CS/GO elektrot malzemelerinin U(VI)'nın radyoaktif atık sudan elektrosorptif olarak uzaklaştırılması için potansiyel uygulamasının olduğunu gösterdi.

Xue ve diğerleri (2021) kaplama yöntemiyle grafit yüzeyine Poliakrilonitril ilave edilmiş, daha sonra tek adımlı hidrotermal yöntemle amidoksim reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. Malzeme analizi sonuçları nitril grubunun amidoksim grubuna dönüştüğünü ve elektrotun iyi bir termal stabiliteye sahip olduğunu gösterdi. Elektrokimyasal test sonuçları, amidoksimle modifiye edilmiş grafit keçe elektrotun, $5 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ tarama hızında 1 M NaCl çözeltisinde $46,5 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ 'lik iyi bir spesifik kapasitans sergilediğini gösterdi. Toplu adsorpsiyon deneylerinin sonuçları, uranyumun adsorpsiyon kapasitesinin -0,9 V'de (SCE'ye kıyasla) $164,75 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 'e ulaşabileceğini gösterdi. Elüsyon maddesi olarak sodyum karbonat kullanıldığında, ters voltajın (0,9 V) etkisi altında elüsyon verimliliği %95 idi. Adsorpsiyon kapasitesi, 5 kez yeniden kullanımdan sonra başlangıç değerinin %90'ına ulaşabilir. Sonuçlar, amidoksimle modifiye edilmiş grafit keçenin, elektroadsorpsiyon yöntemiyle uranyumun sudan uzaklaştırılması için iyi bir uygulama beklentisine sahip olduğunu gösterdi.

Liu ve diğerleri (2022) polietilenimin (PEI) ile modifiye edilmiş çok katmanlı karbon nanotüp (MWCNT)'ler, kolay hidrotermal yöntemle üretildi ve çözelti ortamından uranyum alımı için kullanıldı. FTIR ve XPS test sonuçları, PEI'nin karbon MWCNT'lerin yüzeyine başarıyla yerleştirildiğini gösterdi. Adsorpsiyon deneylerinin sonuçları, PEI@MWCNT'lerin $\text{pH} = 5,0$ 'da en yüksek %96,98 yakalama verimliliğini gösterdiğini, ardından %52,65 ile MWCNT'lerin gösterdiğini ve dağıtım katsayısının $5,56 \times 10^3 \text{ mL/g'ye}$ ulaştığını gösterdi.

Wang ve diğerleri (2020) çalışmalarında, SWCNH-COOH ve SWCNH-TETA, uranyum (VI) iyonu giderimi için trietilentetramin (TETA) ile karboksilasyon ve aşılama yoluyla tek duvarlı karbon nanohornları (SWCNH'ler) kullanılarak üretildi. Yapıları ve morfolojileri TEM, XRD, XPS ve Raman spektroskopisi ile ayrıntılı olarak karakterize edildi. Toplu statik adsorpsiyon yöntemi, pH'ın, adsorpsiyon süresinin, sıcaklığın ve başlangıç konsantrasyonunun U(VI) adsorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkisini derinlemesine araştırmak için kullanıldı. Sonuçlar asitliğin, başlangıçtaki uranyum konsantrasyonunun ve çözeltinin sıcaklığının U(VI) giderimi üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu gösterdi. SWCNH-COOH nano tabakalarıyla karşılaştırıldığında SWCNH-TETA, uranyum iyonları için daha iyi bir adsorpsiyon kapasitesi gösterdi. Termodinamik parametreler U(VI)'nın adsorpsiyonunun

kendiliğinden ve endotermik olduğunu gösterdi. Adsorpsiyon izotermi, Langmuir izoterm denkleminde iyi bir şekilde uyandırulabildi ve kinetik, sorpsiyon işleminin yalancı ikinci derece kinetiğı ile başarılı bir şekilde modellendi. Üstelik SWCNH-TETA mükemmel geri dönüşüm performansı ve seçiciliğı gösterdi. Son olarak, "sonraki" XPS ve DFT hesaplamaları, soğurma yeteneğinin öncelikle SWCNH-TETA'daki uranyum iyonları ve nitrojen atomları arasındaki etkileşime atfedildiğini gösterdi. Beklendiğı gibi, TETA bazlı kompozit yüksek verimli bir uranyum iyonu adsorbentidir.

Akash ve diğeri (2022) çalışması biyoremediasyon yöntemlerinin uygulanmasını açıklamayı amaçlamaktadır. Biyoremediasyon yöntemleri, uranyumun doğal mikroplar ve bitkiler kullanılarak düşük oksidasyonlu forma dönüştürülerek tehlikelerinin ortadan kaldırılmasını içerir. Bu çalışma biyoliç, biyosorpsiyon, biyoredüksiyon ve fitoremediasyon gibi yöntemleri derinlemesine aydınlatmaktadır. Biyoliç işlemi, dört değerlikli uranyumun, liç sıvısı elde etmek için asidofilik metal bakteri kompleksi ile temas geçtiğinde biyooksidasyonunu içerir. Biyosorpsiyonda kitin/kitosan türevli sorbentler şelatör görevi görür ve elektrostatik çekimle uranyuma bağlanır. Biyo indirgeme, uranyumu hareketsiz hale getiren ve azaltan enzimlere bakteriyel bir dönüşüm kullanır. Fitoremediasyon, uranyumun topraktan bitkilerin köklerine ve sürgünlerine ksilem yoluyla fitoekstraksiyonunu ve fitotranslokasyonunu içerir. Farklı yöntemler kullanılarak rapor edilen en yüksek uranyum uzaklaştırma ve alımları şu şekilde sıralanmıştır: biyoliç (%100 uranyum geri kazanımı), biyosorpsiyon (167 g kg⁻¹ uranyum alımı), biyo-indirgeme (%98,9 uranyum geri kazanımı) ve fitoremediasyon (49,639 mg kg⁻¹ uranyum alımı). Yukarıda bahsedilen tüm teknikler arasında biyoliçlemenin, uranyum iyileştirmesi için en etkili teknik olduğu kanıtlanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyaller

Bu çalışmada, Türkiye'nin Çankırı ilinden temin edilen Karakayalar Aş. tarafından sağlanan montmorillonit (spesifik yüzey alanı: 64,2 m²/g) (MMT) kullanılarak nanokompozit hazırlanmasında kullanılmak üzere organo-montmorillonit (OMMT) hazırlandı. Montmorillonit'in XRF kimyasal bileşimleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Montmorillonit (MMT) XRF Kimyasal Bileşimi

Bileşen (%)									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Diğer
59,32	17,19	5,95	3,63	2,21	1,68	0,97	0,74	0,51	7,81

Kompozit matris olarak kullanılmak üzere melamin formaldehit reçinesinin sentezi için melamin, formaldehit (37%), NaOH ve asetik asit ve köpük sentezi için non-iyonik yüzey aktif madde, Tween 80 ve analitik kalitede gliserin, Merck'ten temin edilmiştir. Ayrıca, köpürtme işlemi için petrol eteri kullanılmıştır.

Adsorbat olarak kullanılan U(VI) için 0,12 M'lik stok sulu çözelti, uranyumun Uranilasetatdihidrat tuzu (UO₂(CH₃COO)₂·2H₂O) kullanılarak hazırlanmıştır. Adsorpsiyon deneyleri için farklı konsantrasyonlarda çözeltiler, bu çözeltinin seyreltilmesiyle hazırlanmıştır.

Uranilasetatdihidrat



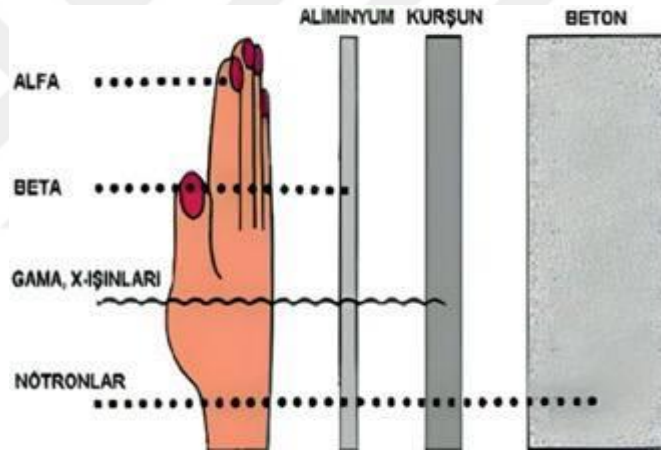
Şekil 4. Uranilasetatdihidrat

Uranilasetatdihidrat, uranyumun bir tuzudur ve kimyasal formülü UO₂(CH₃COO)₂·2H₂O 'dur. Bu bileşik, uranyumun çeşitli laboratuvar uygulamalarında ve elektron mikroskobu örneklerinin kontrastlanmasında kullanılabilir. Uranilasetatdihidrat, sarı

kristaller veya sarımsı toz formunda olabilir. Su ile çözünebilen bir bileşiktir. Elektron mikroskobu örneklerinin kontrastlanmasında kullanıldığında, uranilasetatdihidrat, uranyumun yüksek atom numarası değeri nedeniyle elektronlar tarafından güçlü bir şekilde saçılma gösterir, bu da örnek içindeki yapıları vurgular. Uranilasetatdihidrat'ın radyoaktif olabilecek bir uranyum izotopu olan uranyum-235 içerdiği unutulmamalıdır. Bu nedenle, kullanımı ve depolanması sıkı güvenlik protokollerine tabi olmalıdır. Bu tür malzemelerle çalışırken güvenlik standartlarına uymak önemlidir. Uranilasetatdihidrat radyasyon kaynağı olan bir maddedir.

○ **Radyasyon kaynaklarının ışınları**

- **Alfa:** İnce bir kâğıt tabakası veya cildimiz tarafından soğurulur.
- **Beta:** İnce bir metal tabakası tarafından soğurulur.
- **Gama:** Daha enerjik olup kurşun ve beton gibi yoğun malzemelerde soğurulur.
- **Nötron:** Parafin, beton, su gibi hidrojen zengin ortamlarda soğurulur.



Şekil 5. Radyasyon kaynaklarının geçirgenlikleri

Kil

Killer genellikle polimerik malzemelerin mekanik özelliklerini artırmak için kullanılan güçlendirici dolgu maddeleridir. Safılık düzeyi ve katyon değişim kapasitesi, killerin polimerlerle birleştiğinde mekanik güçlerini etkileyen iki kritik özelliktir. Killer içerisindeki safılık, polimerin mekanik özelliklerini ve katyon değişimini olumlu yönde etkiler. Ek olarak, killer genellikle uygun bir katalizör haline getirilebilmek için iyon değişimi, metal elemanlarla doyurulma veya asit etkileşimi gibi yöntemlerle modifiye edilebilir, bu da maliyet etkinliğini artırır.

Jeoteknik sınıflandırmada kil, ince taneli zeminler grubuna aittir. Kil parçacıkları genellikle 0,002 mm'den daha küçük boyutlarda tanımlanır, ancak bazen 0,002-0,005 mm

arasındaki parçacıklar da kil olarak kabul edilebilir. Killer, zemin mekaniği (jeoteknik) uygulamalarında bir miktar su ile karıştırıldığında hamur kıvamını alabilir (Das 1990).

Killer, genellikle 1 nm kalınlığında küçük ve düzensiz kil plakalarını içerir, bu plakalar elektron mikroskobu altında yüksek çözünürlük gücüyle görülebilir. Bu özellik, killerin doğal mineral malzemeler gibi geniş bir tanıma sahip olduğunu ortaya koyar (Küroğlu 2004).

Melamin

Melamin, kimyasal yapısı nedeniyle son derece dayanıklı ve uzun ömürlü bir malzeme olup, özellikle su içinde çözülebilen organik bir bileşiktir. Büyük bir kısmını oluşturan azot içeriği sayesinde alev almaya karşı dirençli ve yüksek ısıya dayanıklı bir özellik gösterir. Melamin, formaldehit adlı yanıcı ve toksik bir madde ile birleştirildiğinde, suya karşı dirençli, sağlam ve kırılmaya karşı dayanıklı bir madde haline gelir. Bu kimyasal reaksiyon sonucunda ortaya çıkan 'melamin reçinesi', mutfak tezgâhları gibi birçok ürünün yapımında kullanılır. Kimyasal işlemlerle melamin, mutfak eşyaları, ses izolasyon malzemeleri, tekstil ürünleri, alev geciktirici kimyasallar, temizlik ürünleri, yazı tahtaları, zemin kaplamaları, gübre ve hayvan yemleri gibi çeşitli ürünlerin hammaddesi olarak veya farklı reaksiyonlarla işlenerek kullanılır.

Formaldehit

Formaldehit (CH_2O), oda sıcaklığında renksiz, oldukça toksik ve yanıcı bir gazdır. Tarım gübreleri, kâğıt, kontrplak ve bazı reçinelerin üretiminde kullanılır. Aynı zamanda ev ürünlerinde, gıda koruyucularında, antiseptiklerde, ilaçlarda ve kozmetik ürünlerde de kullanım bulur. Formaldehite maruz kalmak, cilt, boğaz, akciğer ve göz tahrişine neden olabilir. Tekrarlanan maruziyet, potansiyel olarak kansere yol açabilir. Formaldehit, birçok endüstri dalında kullanılmaktadır. Tutkal ve reçinelerden, boyalara, tekstillere, dezenfektanlara, inşaat malzemelerine, otomobil parçalarına, mumyalamaya ve laboratuvarlara kadar geniş bir uygulama yelpazesi bulunmaktadır.

Yöntem

Organo kilin hazırlanması

Organo-kil (OMMT), katyonik yüzey aktif madde olan Setyltrimetil Amonyum Bromür (CTAB) (Merck'ten satın alınmıştır.), hidrokarbon malzeme ve montmorillonit kullanılarak çözelti interkalasyon yöntemiyle hazırlandı. Bazı özellikleri Tablo 3'te verilen montmorillonitin, çözelti harmanlama yöntemiyle hazırlandığı önceki çalışmalardaki aynı prosedür takip edildi (Gürses ve Şahin, 2023).

Tablo 3. Hidrokarbon Malzemesinin Bazı Özellikleri

Yoğunluk (15 °C), kg/m ³	Kalori değeri MJ/kg	Parlama noktası° C	Nem Ağ. %	C	H	N	S	Kül
990,7	42,74	105,8	0,1	83,4	11,9	0,8	1,5	0,03

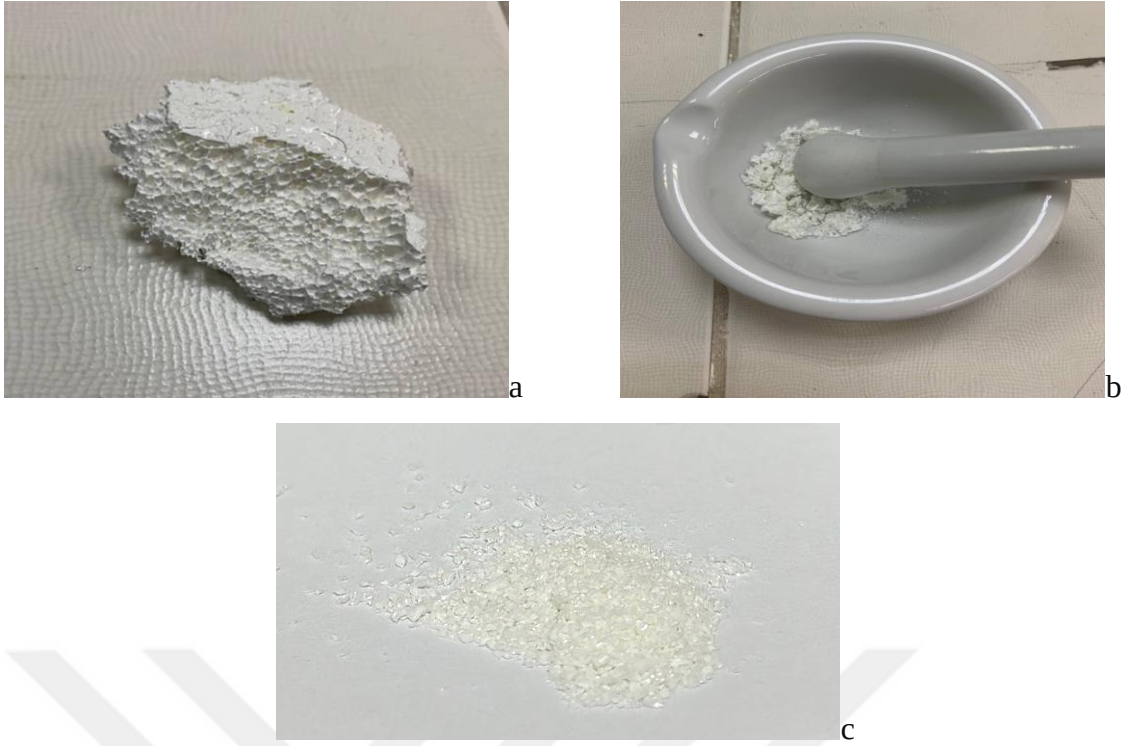
**Şekil 6.** Organo-kil

Melamin formaldehit önpolimer (MF) ve MF-organo-kil nanokompozitinin (MFKNK) hazırlanması

%37 formaldehit ve melaminin (1,0/1,1 oranında) bulunduğu bir karışım, termometre ve soğutma ekipmanı ile donatılmış üç boyunlu düz tabanlı bir balon içine yerleştirildi. Karışım, manyetik bir karıştırıcı kullanılarak homojen hale gelene kadar yaklaşık 60 °C'de ısıtıldı. Son olarak, pH değeri 8,5'e ulaşması için %40 sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi eklenerek karışımın viskozitesi göz önüne alınarak yaklaşık 95 °C'de 1 saat boyunca reaksiyona sokuldu.

Daha sonra, nötralizasyon için uygun miktarda konsantre asetik asit, %1,0 gliserin ve Tween 80 ile birlikte %6,0 petrol eteri eklenerek, elde edilen ön polimerin mekanik karışımı kuvvetlice gerçekleştirildi. MF organo kil nanokompoziti, in situ sentezle hazırlandı ve %0,15 oranında organo kil içeren balona eklenerek hazırlandı. Nanokompozit hazırlanırken, belirli bir miktarda MFKNK tozu eklenmiş ve karışımın karıştırılması devam etmiştir. Oluşan karışım, uygun bir kap içinde 2 dakika boyunca mikrodalga radyasyonuna maruz bırakıldı.

Son olarak, karışım, suyu ve geriye kalan formaldehitin uzaklaştırılması ve tamamen iyileşme sağlanması için 140 °C'de 1 saat boyunca sıcak hava fırınında bir modüler kare alüminyum kalıba alındı (Gürses ve Şahin, 2023). Saf MF köpüğü ve MF organo kil nanokompozit köpüğünün tekstürel, yapısal ve kristalografik karakterizasyonu için yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskopu (HRTEM), Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometresi (FTIR) ve X-ışını kırınımı (XRD) difraktometresi kullanılmıştır.

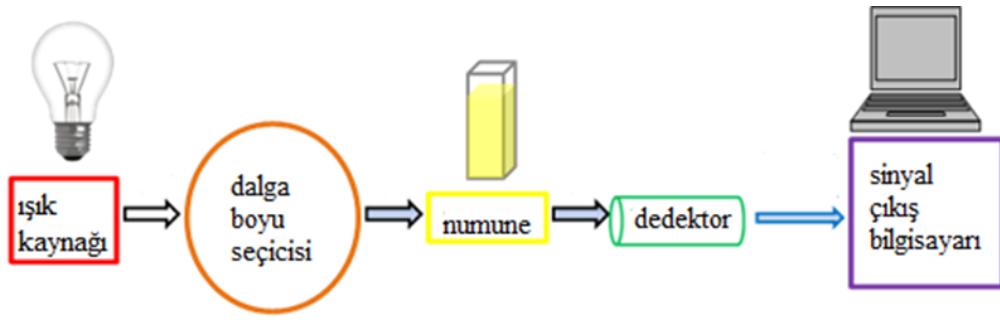


Şekil 7. Hazırlanan MF köpük

UV-Vis Spektrofotometre

UV-Vis spektrofotometre, bir referans veya boş numuneyle karşılaştırıldığında bir numune tarafından emilen veya içinden iletilen UV veya görünür ışığın ayrı dalga boylarının miktarını ölçen analitik bir tekniktir. Bu özellik numune bileşiminden etkilenir ve numunede ne olduğu ve hangi konsantrasyonda olduğu hakkında potansiyel olarak bilgi sağlar. Işık, dalga boyuyla ters orantılı olan belirli bir enerjiye sahiptir. Böylece ışığın kısa dalga boyları daha fazla enerji taşırken, daha uzun dalga boyları daha az enerji taşır. Bir maddedeki elektronları emilim olarak algılayabileceğimiz daha yüksek bir enerji durumuna yükseltmek için belirli bir miktarda enerjiye ihtiyaç vardır. Bir maddedeki farklı bağlanma ortamlarındaki elektronlar, elektronları daha yüksek bir enerji durumuna yükseltmek için farklı miktarda spesifik enerji gerektirir. Işık farklı maddelerde farklı dalga boylarında emilmesinin nedeni budur.

UV-Vis spektrofotometre bilgileri, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak absorbans grafiği olarak sunulur ve işlemi Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Bir UV-Vis spektrofotometresindeki ana bileşenlerin basitleştirilmiş şeması

Işığa dayalı bir teknik olarak, geniş bir dalga boyu aralığında ışık yayabilen sabit bir kaynak gereklidir. Tek bir ksenon lamba hem UV hem de görünür aralıklar için yüksek yoğunluklu bir ışık kaynağı olarak yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, ksenon lambalar daha yüksek maliyetlere sahiptir ve tungsten ve halojen lambalarla karşılaştırıldığında daha az stabiliteye sahiptir.

İki lamba kullanan cihazlarda, görünür ışık için genellikle bir tungsten veya halojen lamba kullanılır, UV ışığının ortak kaynağı ise döteryum lambasıdır. Hem UV hem de görünür dalga boylarını taramak için iki farklı ışık kaynağına ihtiyaç duyulduğundan, ışık kaynağı cihazdaki ölçüm sırasında değiştirilmelidir.

UV-Vis spektroskopisi, analiz için belirli bir maddenin en fazla ışığı emdiği dalga boyunun seçilmesini içerir. Bu yaklaşım, belirli bir analit konsantrasyonu için en yüksek tepkiye ulaşıldığı için maksimum hassasiyet sağlar. Bir stok çözeltinin seyreltilmesi yoluyla bilinen konsantrasyonlara sahip standart çözeltiler hazırlanarak, bunların absorbansları ölçülerek ve veriler bir absorbans-konsantrasyon grafiğine çizilerek, konsantrasyon ile absorbans arasında sayısal bir ilişki kurulur. Bu işlem, en küçük kareler doğrusal regresyon denklemini kullanarak, veri noktalarının daha iyi bir uyumu gösteren düz bir çizgiye daha yakın hizalanmasıyla bir kalibrasyon eğrisi oluşturulur.

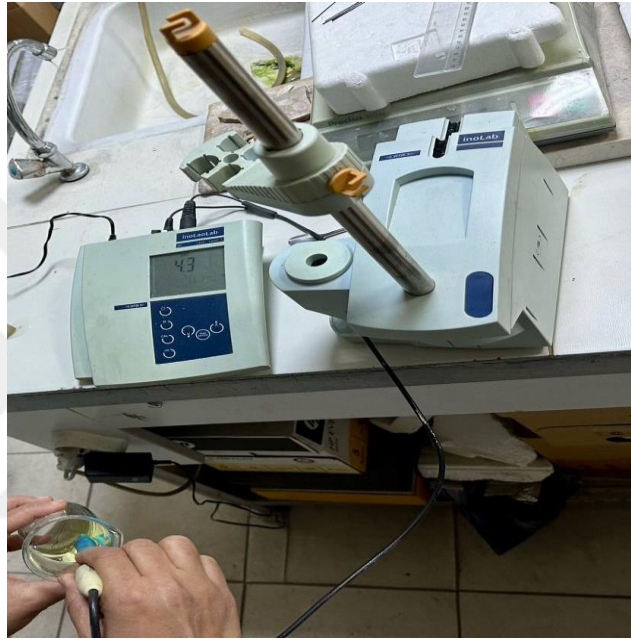


Şekil 9. UV-Vis Spektrofotometresi

Adsorpsiyon Deneyleri

Sulu çözeltiden uranyum (U(VI)) adsorpsiyonu, toz melamin formaldehit köpüğü (MFK) ve melamin formaldehit kil nanokompozit köpüğü (MFKNKK) üzerinde adsorpsiyon deneyleri kullanılarak gerçekleştirildi. Bu amaçla, 1 litre saf suya 50,88 g uranilasetat ilave edilerek bir çözelti hazırlandı. Daha sonra hazırlanan çözeltiden 50 ml alınarak 1 litreye tamamlandı. 0,1g her adsorbentten, çeşitli başlangıç U(VI) konsantrasyonlarına sahip (600, 1200, 1800, 2400, 3000 μM) sulu çözeltilere eklenmiştir.

Adsorbenti karıştırmadan önce çözeltinin pH'sı ölçüldü ve pH'nın 4,3 olduğu belirlendi.



Şekil 10. pH metre

Balonlar, termostatik bir çalkalayıcıda 298 K, doğal pH 4,3 ve 150 dk⁻¹ karıştırma hızında çeşitli denge adsorpsiyon süreleri boyunca çalkalandı.



Şekil 11. Termostatik çalkalayıcı



Şekil 12. Santrifüj cihazı

Her adsorpsiyon işlemi sonunda, karışım 5 dakika boyunca 3750 dk⁻¹'de santrifüjlendi ve supernatanın absorbansı, UV-vis spektrofotometre (Shimadzu 1201 UV-Vis) kullanılarak 433 nm'de ölçülmüştür. Numunelerden kalan kalıntılar Şekil 13'te görüldüğü gibi önce dikkatlice süzüldü, ardından özenle kurutuldu. Kuruma işlemi etüvde 110°C'de gerçekleştirildi. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen katılar, analiz verilerini alabilmek için titizlikle poşetlere yerleştirildi.



Şekil 13. Süzme ve kurutma aşaması

Dağılım katsayısını (D), adsorplanan U(VI) miktarını (q) ve giderim oranını (% R) hesaplamak için sırasıyla denklem 1, 2 ve 3 kullanılmıştır.

$$D = (C_0 - C_e)/C_e \quad (1)$$

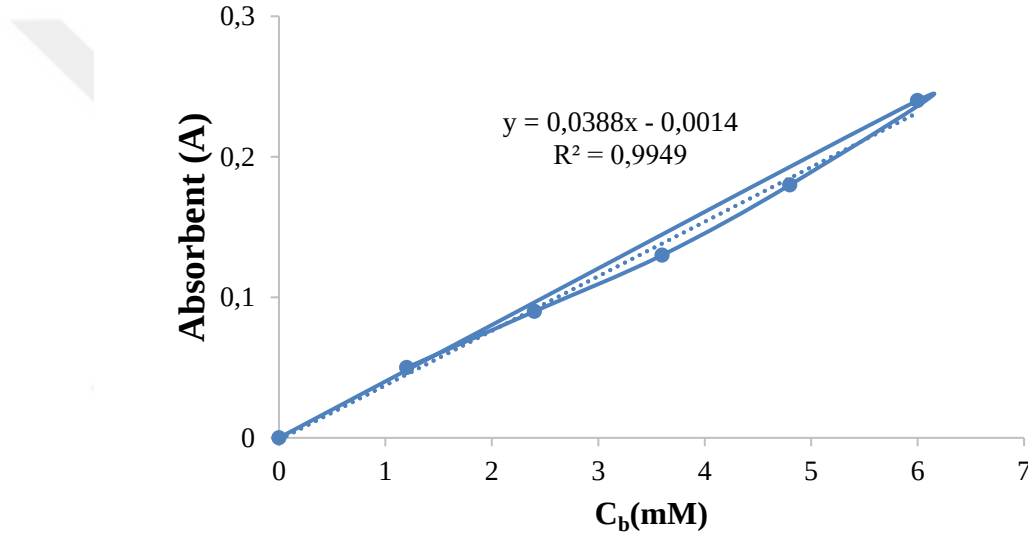
$$q\left(\frac{\mu\text{mol}}{\text{g}}\right) = (C_0 - C_e)V/m \quad (2)$$

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \cdot 100 \quad (3)$$

Burada, C_0 ve C_e sırasıyla başlangıç ve denge U(VI) konsantrasyonları (μM), V toplam hacim (L) ve m , MFKNK köpük kütlesi (g) olarak tanımlanır.

UV-Vis Spektrofotometre ile Konsantrasyon Belirlenmesi

Hazırlanan standart çözeltilerin absorbans değerleri ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak bir kalibrasyon grafiği çizilmiştir. Şekil 14'te kalibrasyon grafiğinden elde edilen eğim ve kesişim noktaları kullanılarak kalibrasyon denklemi oluşturulmuş ve R^2 değeri hesaplanmıştır. Bilinmeyen örnek çözeltilerinin absorbans değerleri, kalibrasyon grafiğinde elde edilen denkleme göre değerlendirilerek konsantrasyonları hesaplanmıştır.



Şekil 14. UV-Vis spektrofotometre kullanarak çizilen kalibrasyon grafiği

Zeta Potansiyel Ölçümü

Askıdaki parçacıkların elektroforetik hareketliliğini ve zeta potansiyelini ölçmek için yaygın bir araç olan zeta metre sistemi, koloidal dispersiyonların stabilitesini ve karmaşık polimerlerin davranışını anlamak için çok önemli olan zeta potansiyelini belirlemek için etkili bir araçtır. MF köpük ve MF organo kil nanokompozit su süspansiyonlarındaki katı partiküllerin zeta potansiyelleri ve süspansiyonların elektriksel iletkenlik değerleri zeta meter 3.0+ cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

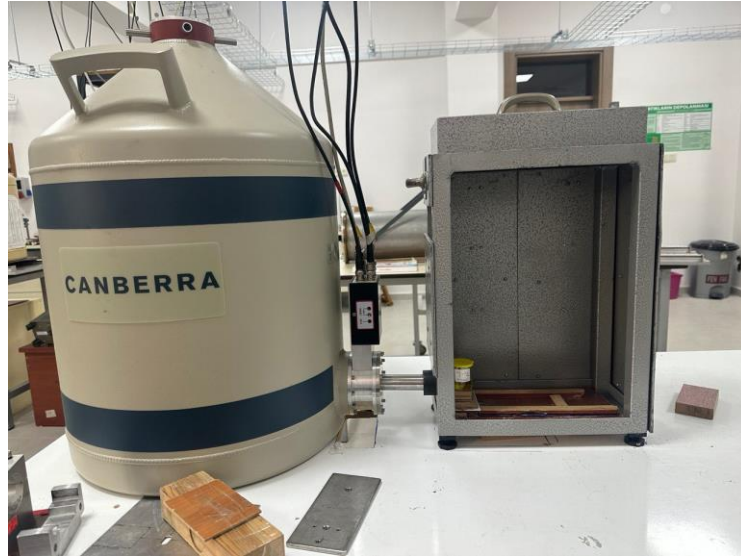


Şekil 15. Zeta metre

Daha önce pH ölçümü için hazırlanan numuneler, içerisinde kalan kalıntıları dikkatlice süzildükten sonra özenle kurutuldu. Daha sonra elde edilen kurumuş katı numunelerden belirli bir miktar, zeta potansiyeli (ZP) ölçümleri için kullanıldı. Bu amaçla, numuneden alınan bir miktar, 20 ml saf su ile karıştırıldı. Karışımın homojen olması sağlandıktan sonra, bu çözelti cihaza yerleştirilerek zeta potansiyeli ölçümleri gerçekleştirildi. Bu adım, numunelerin su içindeki yüzey potansiyellerini belirlemek amacıyla yapılan ölçümleri içermektedir.

Radyoaktivite Ölçümü

Bir Germanium dedektörü, X ışınları ve gama ışınları gibi iyonlaştırıcı radyasyonu algılamak için yarı iletken bir malzeme olan germanium'u kullanan bir tür radyasyon dedektörüdür. Bu dedektörler, nükleer fizik deneyleri, çevresel izleme ve endüstrilerde kalite kontrolü gibi çeşitli bilimsel ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Germanium dedektörleri, diğer dedektör türleriyle karşılaştırıldığında üstün enerji çözünürlüğü nedeniyle yüksek çözünürlük spektroskopisi gerektiren deneylerde özellikle değerlidir.



Şekil 16. Germanium dedektörü

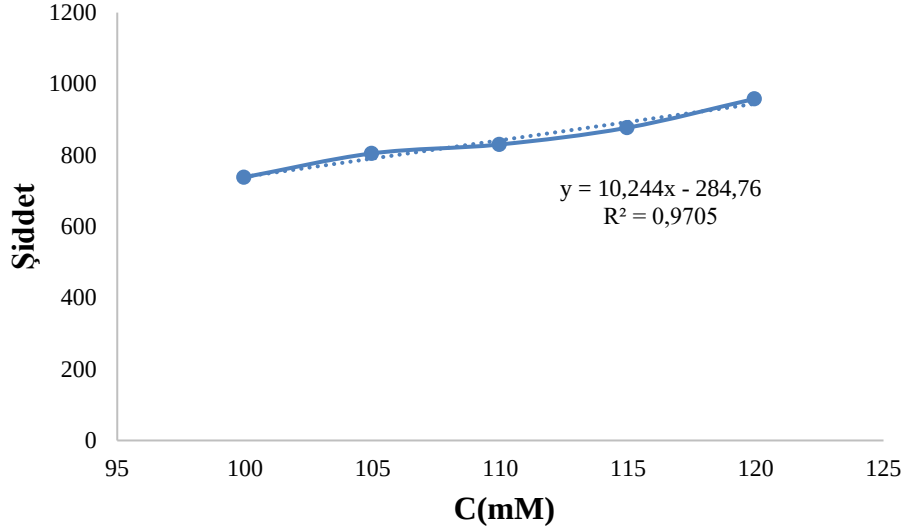
Gama ışınlarını ölçerek farklı konsantrasyonlarda şiddeti belirledik ve elde edilen grafiklerle radyasyonun adsorbe olan kısmını incelemek için titiz bir çalışma gerçekleştirdi. Bu çalışmada, MFK ve MFKNKK olmak üzere iki farklı adsorbent kullanıldı. Her bir adsorbent, 0,1 gram olarak alınıp beş farklı konsantrasyonda (80, 85, 90, 95 ve 100 mM) çözeltilere eklenerek homojen bir dağılım sağlandı.

Daha sonra belirli zaman aralıklarında (30 dk, 90 dk, 150 dk) çalkalama işlemi uygulandı ve numuneler, çalkalama sonrasında homojen dağılımın sağlanması için santrifüje tabi tutuldu. Santrifüj işlemi sonunda, şiddet ölçümleri yapıldı.

Elde edilen veriler, düzenli bir tablo halinde kaydedilerek analiz için hazır hale getirildi. Bu kapsamlı çalışma, farklı adsorbentlerin gama ışınlarını adsorpsiyon yeteneklerini karşılaştırmamıza ve en etkili adsorbenti belirlememize olanak sağlayacak değerli bilgiler sunmaktadır.

Radyoaktivite şiddet ölçümü ile konsantrasyon belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında, farklı konsantrasyonlarda standart çözeltiler hazırlanmış ve radyoaktivite şiddeti ölçülmüştür. Hazırlanan standart çözeltilerin radyoaktivite şiddeti ölçülmüş ve bu değerler kullanılarak bir kalibrasyon grafiği çizilmiştir. Şekil 17'de kalibrasyon grafiğinden elde edilen eğim ve kesişim noktaları kullanılarak kalibrasyon denklemi oluşturulmuş ve R^2 değeri hesaplanmıştır. Bilinmeyen örnek çözeltilerinin radyoaktivite şiddeti, kalibrasyon grafiğinde elde edilen denkleme göre değerlendirilerek konsantrasyonları hesaplanmıştır.



Şekil 17. Radyoaktivite şiddet ölçümüne dayalı kalibrasyon grafiği

Kullanılmış Radyoaktifin Güvenli Bir Şekilde İmha Edilmesi

Kullanılmış radyoaktif maddelerin güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi, çevre kontaminasyonunu önlemek, güvenliği sağlamak ve radyasyon maruziyetini minimize etmek için kritik bir önem taşır. Bu süreçte, aşağıda belirtilen yönergelerin dikkate alınması gereklidir. Bu çalışmada bunlar titizlikle dikkate alınmıştır.

- **Radyoaktif atık tanımı ve sınıflandırma:**

Kullanılmış radyoaktif maddelerin doğru bir şekilde tanımlanması ve sınıflandırılması, bertaraf sürecinin etkinliği için temel bir adımdır. Bu adım, atıkların ölçülmesi ve analizi ile desteklenmelidir.

- **Yerel ve ulusal yönergelerin incelenmesi:**

Radyoaktif atıkların güvenli bir şekilde bertarafı için geçerli olan yerel ve ulusal yönergelerin düzenli olarak incelenmesi, mevcut düzenlemelere uyum sağlanmasını ve uzman görüşlerinin alınmasını içermelidir.

- **Güvenli depolama ve erişim kontrolü:**

Kullanılmış radyoaktif maddeler, özel olarak tasarlanmış ve güvenli depolama alanlarında muhafaza edilmelidir. Bu alanlara sadece yetkili personelin erişimine izin verilmelidir.

- **Çift konteynerleme ve etiketleme:**

Kullanılmış radyoaktif maddelerin güvenli bir şekilde paketlenmesi için çift konteynerleme yöntemi kullanılmalıdır. Ayrıca, her konteyner doğru bir şekilde etiketlenmeli

ve içeriği hakkında detaylı bilgiler içermelidir.

- **Bertaraf lisansları ve iş birliği:**

Radyoaktif atıkların bertaraf edileceği tesislerden alınan uygun lisanslar, yasal gerekliliklere uygunluğu sağlamak adına önemlidir. Ayrıca, lisanslı bertaraf tesisleriyle etkin bir iş birliği kurulmalıdır.

- **Taşıma ve güvenli nakliyat:**

Kullanılmış radyoaktif maddelerin taşınması, ilgili taşıma yönergelerine tam uyum içinde gerçekleşmelidir. Yetkili taşıma şirketleriyle iş birliği yapılmalı ve taşıma süreci güvenli bir şekilde yönetilmelidir.

- **Personel eğitimi ve düzenli izleme:**

Atık yönetimi konusunda personelin düzenli olarak eğitilmesi ve radyasyon güvenliği konularında düzenli eğitimlerin düzenlenmesi önemlidir. Ayrıca, radyoaktif atık depolama alanları ve bertaraf tesisleri düzenli olarak izlenmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır.

- **Çevresel etkilerin sürekli değerlendirilmesi:**

Radyoaktif atıkların çevresel etkileri düzenli olarak değerlendirilmeli ve atıkların çevresel unsurlara etkisi titizlikle takip edilmelidir.

Bu yönergelerin dikkate alınması, kullanılmış radyoaktif maddelerin güvenli bir şekilde bertaraf edilmesinde etkili bir strateji oluşturacaktır.

Enstrümental Analizler

Adsorbentlerin doğru sentezini sağlamak için sentezlerinden sonra analizler yapmak ve sentezlenen malzemelerin yapısını kontrol etmek gerekir. Ham kil, organo kil, MF köpük ve MF organo kil nanokompozit köpüğün yapısal, kristalografik ve tekstürel karakterizasyonu, XRD ve FTIR gibi spektroskopik teknikler ile HRTEM gibi mikroskopik teknikler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

FTIR analizi

Kızılötesi spektroskopinin temeli, radyasyonun soğurulması ve moleküllerin ve çok atomlu iyonların titreşimsel hareketlerinin araştırılmasıdır. Bu yöntem, malzemelerin ve kimyasal bileşiklerin yapısını belirlemek için güçlü ve yaygın bir yöntem olarak kabul edilir. Bu yöntem genellikle organik bileşikleri tanımlamak için kullanılır, çünkü bu bileşiklerden oluşturulan spektrumlar genellikle karmaşıktır ve karşılaştırmalı amaçlar için kullanılabilecek çok sayıda maksimum ve minimum piklere sahiptir. Moleküllerde iki tür germe ve eğilme

titreşimi vardır. Çekme titreşimi simetrik ve asimetrik kategorilere ayrılır. Kızılötesi radyasyonun istenen numune ile çarpışması, moleküllerindeki bağın titreşim enerji seviyesinde bir değişikliğe neden olur ve moleküler yapıdaki fonksiyonel grupları tanımlamak için uygun bir yöntemdir. Molekül tarafından kızılötesi enerjinin absorpsiyonu, titreşim sırasında dipol momentini değişirse meydana gelir.

Bu analizden elde edilen spektrumlarda, her biri numune bileşiminde belirli bir bağın varlığını gösteren farklı aralıklarda pikler bulunmakta ve piklerin baz spektrumları ile karşılaştırılmasıyla bağların tipi ve yapısı anlaşılabilmektedir.

Örneklerin FTIR spektrumları da Vertex 70 V FTIR spektrometresi kullanılarak 4.000 ila 400 cm^{-1} aralığında, ortalama 100 tarama ve 1 cm^{-1} çözünürlükte alınmıştır.



Şekil 18. FTIR cihazı

XRD analizi (X-ışını kırınımı)

X-ışını kırınımı yöntemi, malzemelerin faz tipini ve kristal yapısını doğrudan belirlemeye yönelik bir yöntem olduğu için çok önemlidir. Aslında, faz tanımlama, kristalografi ve mineralojideki son yıllardaki ilerlemeler, X-ışını kırınım yönteminin keşfini takip etmiştir. XRD'nin çıktı spektrumlarını inceleyerek, malzemelerin kristal yapısı, tane boyutu, atomlar arası mesafe ve kristal kusurları hakkında bilgi elde etmek mümkündür. Her kristal yapı, kimliğini parmak izi gibi belirlemek için kullanılan belirli bir X-ışını modeline sahiptir. Her numune için elde edilen spektrumların temel spektrumlarla karşılaştırılmasıyla malzemenin kristal yapısı anlaşılabilir. Hazırlanan örneklerin XRD difraksiyon diyagramları, PANalytical Empyrean cihazı kullanılarak alınmıştır.



Şekil 19. XRD cihazı

HRTEM (Yüksek Çözünürlüklü Transmisyon Elektron Mikroskobu)

HRTEM analizi, genellikle 4 ila 5 nanometre altındaki çok ince detayların görüntülenmesi ve incelenmesi için kullanılan bir tür geçişli elektron mikroskopları ailesinin bir üyesidir. Bu yöntemde elektron demeti numuneye ışınlanır ve iletilen demet dedektörler tarafından siyah beyaz görüntülere dönüştürülür. Örneklerin HRTEM görüntüleri, 120.0 kV'de çalışan HITACHI HT7700 yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu (LaB6 filaman) kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 20. HRTEM cihazı

Adsorpsiyon Süresinin Etkisinin İncelenmesi

Adsorpsiyon süresinin etkisini değerlendirmek ve optimum etki zamanını belirlemek amacıyla, beş farklı konsantrasyonda (600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 μM) çözelti hazırlandı. Ardından, 0,1 gram adsorbent eklenerek çalkalayıcıda karıştırıldı ve bu işlem, iki farklı adsorbent için (MFK ve MFKNKK) tekrarlandı.

Zaman aralıkları 30 dakika, 90 dakika, 150 dakika ve 21 saat olarak belirlendi. Her bir zaman diliminin sonunda, numunelerden 10 ml alınarak santrifüj edildi ve ardından UV-Vis spektrofotometre ile ölçümü gerçekleştirildi.

Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi

Sıcaklıkla, U(VI) adsorpsiyonundaki değişiklikleri incelemek ve termodinamik analiz için gerekli verileri elde etmek amacıyla deneyler çeşitli başlangıç U(VI) konsantrasyonlarında, üç farklı sıcaklıkta (25, 45 ve 65°C), 0,1 g/100 mL katı/sıvı oranında ve doğal pH'da 90 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir.



Şekil 21. Farklı sıcaklıklarda yapılan deneyler

pH Etkisinin İncelenmesi

Başlangıç pH'ının etkisini incelemek için deneyler, pH değerleri 1,0, 3,0, 11,0 ve 13,0 olan çözeltilerde 25°C'da, başlangıç U(VI) konsantrasyonu 3,0 μ M ve katı/sıvı oranı 0,1g/mL olacak şekilde 90 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Çözeltilerin pH'sı, konsantre HCl ve NaOH çözeltileri kullanılarak ayarlanmış ve ölçümler, bir WTW inoLab pH metre (WTW Inc., Almanya) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 22. Farklı pH’lardaki çözeltiler

Katı-Sıvı Oranının Etkisinin İncelenmesi

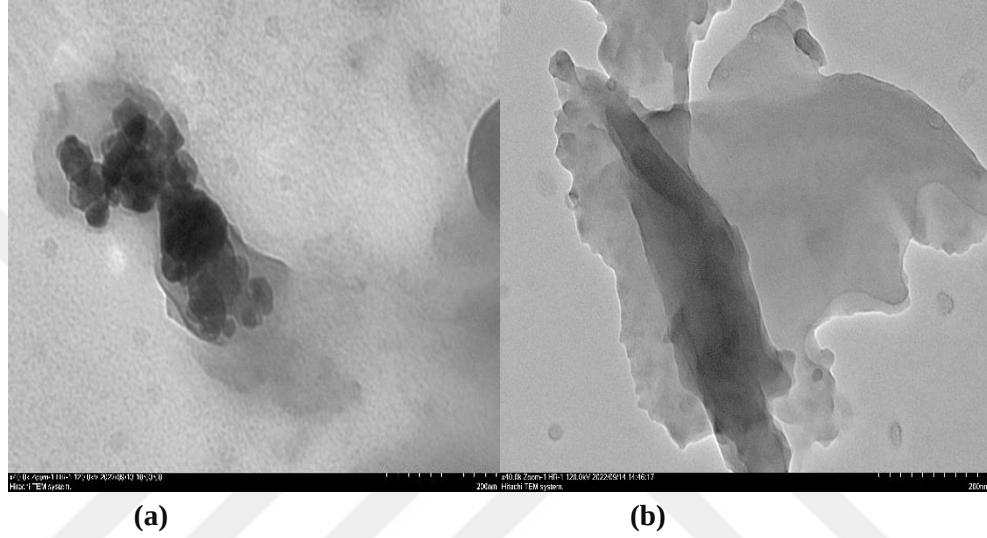
Adsorbent dozajının U(VI) adsorpsiyonu üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için deneyler, doğal pH ve 25°C’de, başlangıç U(VI) konsantrasyonu 1200 μ M için 0,05, 0,10, 0,15, 0,20 ve 0,25 g/mL katı/sıvı oranlarında 90 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir.

10 adet numune hazırlandı. Numunelerin beşine belirlenen miktarlarda MF eklenirken, diğer beşine MFKNKK eklendi. 90 dakika çalkalandıktan ve santrifüj edildikten sonra numunelerin UV spektrofotometre cihazından absorban değerleri ölçüldü.

ARAŞTIRMA BULGULAR ve TARTIŞMA

HRTEM Analizi

Melamin formaldehit köpüğü (MFK) ve melamin formaldehit organo-kil nanokompozit köpüğü (MFKNKK)'nin dokusal, yapısal ve kristalografik karakterizasyonu şekil 23'te görüntülenmektedir.

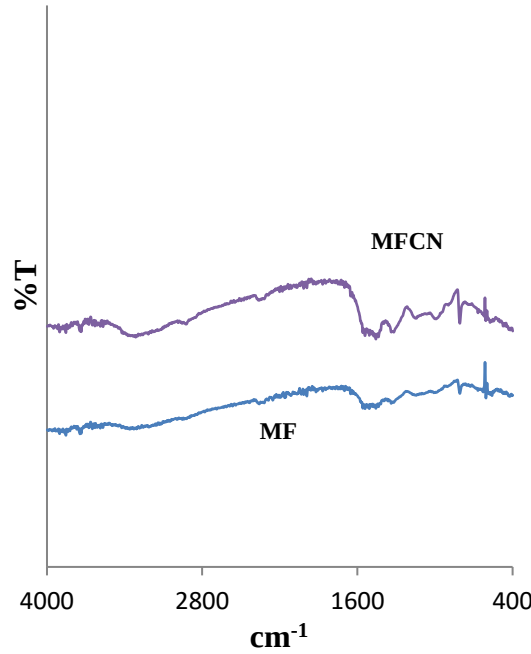


Şekil 23. a) Melamin formaldehit köpüğü (MFK), b) Melamin formaldehit nanokompozit köpüğü (MFKNKK) için HRTEM görüntüleri

Şekil 23 a'dan, saf MF köpüğünün bir araya gelmiş mikro küreler şeklinde oluştuğu ve bu agregaların üç boyutta geliştiği görülebilir. Bu dokusal düzenleme, muhtemelen sertleşmeden önce mikrodalga radyasyonu destekli köpürmeye bağlıdır. Mikrodalga radyasyonunun etkisi altında, köpürme işlemi homojen ve kontrol edilebilir bir şekilde gerçekleşir, bu da sonucunda homojen mikro küre oluşumuna neden olur. Şekil 23 b'de ise polimer matris içindeki organo kil plakalarının eksfoliasyonu sonucunda MFK moleküllerinin küme halinde düzenli bir şekilde dağıldığını veya ayrıldığını görebiliriz. Bu durum, nanokompozit köpüğün yapısal özelliklerindeki gelişimi ve kil plakalarının dağılmasıyla birlikte, MFK moleküllerinin düzenli bir şekilde dağıldığı ve küresel yapısını koruduğu bir yapı oluşturulduğunu göstermektedir. Bu da nanokompozit köpüğün özellikle belirli bir homojenlik ve performans elde etme amacına yönelik başarılı bir sentezi işaret etmektedir.

Melamin formaldehit köpüğü (MFK) ve melamin formaldehit nanokompozit köpüğünün (MFKNKK) FTIR spektrumları Şekil 24'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Şekil 24'teki MFK'in FTIR spektrumundaki belirgin pikler, 3327 cm^{-1} , 1016 cm^{-1} , 1541 cm^{-1} ve

1450 cm^{-1} 'de yer almaktadır. Bu pikler sırasıyla N-H ve O-H bağlarının gerilme titreşimi, C-O-C bağlarının gerilme titreşimi ve C=N bağlarının gerilme titreşimine karşılık gelir. Bu çizgiler, melamin formaldehit reçinesinin başarıyla sentezlendiğini gösterir. N-H ve O-H bağları, moleküler yapının amonyak ve hidroksil gruplarına işaret ederken, C-O-C bağları, formaldehit moleküllerinin varlığını belirtir. C=N bağlarının varlığı ise melamin moleküllerinin katılımını gösterir. Bu spektral özellikler, MF köpüğün kimyasal bileşimini belirlemede etkili araçlardır ve sentezlenen nanokompozit köpüğün özelliklerini anlamak için kullanılır (Gürses ve Şahin, 2023).

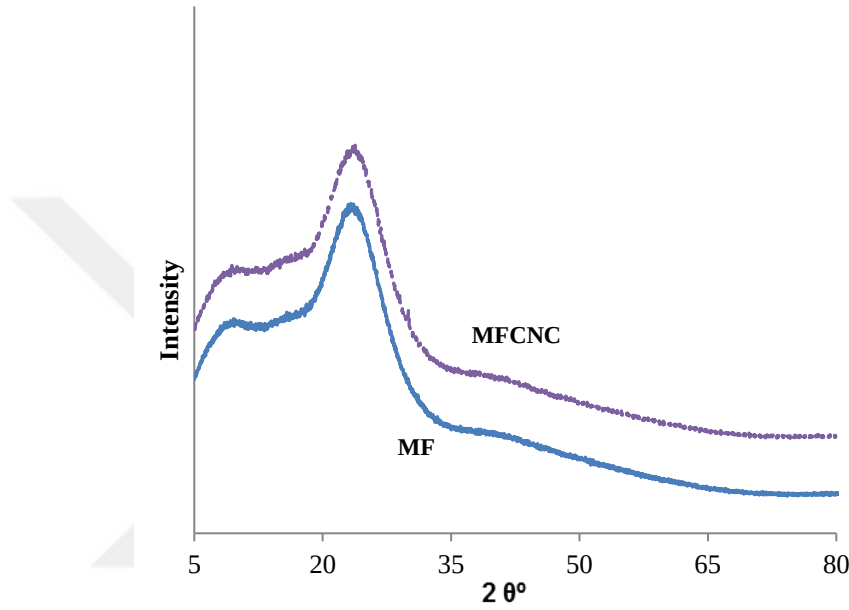


Şekil 24. Melamin Formaldehit Köpüğü (MFK) ve melamin formaldehit organo kil nanokompozit köpüğünün (MFKNKK) FTIR spektrumları

Şekil 24'te, MF-organo-kil nanokompozitin (MFKNKK) FTIR spektrumunda, CTAB'den (Stearytrimetilamonium Bromür) kaynaklanan güçlü pikin dışında, sekonder amin grubunun gerilme titreşimine karşılık gelen 3354 cm^{-1} 'deki üç daha pik görülmektedir. Ayrıca, 2926, 2914 ve 2881 cm^{-1} 'de görülen bu özel pikler, kil tabakaları ile uzun zincirli hidrokarbon molekülleri tarafından bağlanan CTA^+ iyonları arasındaki etkileşimler nedeniyle daha düşük yoğunlukta ve daha düşük değerlere kaymıştır. Aynı zamanda, sırasıyla 1454 cm^{-1} ve 1129 cm^{-1} 'de iki pik gözlemlenmiştir; bunlar, CTAB'nin C-N germe ve N-H bükülme modlarına karşılık gelir. Diğer taraftan, 1302–1657 cm^{-1} bölgesinde görülen piklerin, su molekülünün bağlı baş grup etrafındaki CH_2 kesme titreşim modu ve O-H bükülme moduna ait olduğu söylenebilir. 1000 cm^{-1} ile 500 cm^{-1} arasında gözlemlenen ana fonksiyonel gruplar Si-O ve Al-OH'dir. 866 cm^{-1} 'deki pik, Al-OH bükülme titreşimlerine karşılık gelirken, 802 cm^{-1} 'de SiO_2 'deki çift Si-O-

Si bağları ve $714\text{--}617\text{ cm}^{-1}$ civarında gözlemlenen Si-O germe titreşimleri kuvarsın varlığını göstermektedir. $3356\text{--}3730\text{ cm}^{-1}$ civarında güçlü bantlar, hidroksil bağlarının varlığını gösterir. Bu piklerin düşük yoğunluklu ve özgün değerlerinden kaymış bir şekilde görünmesi, kil levhaları ile uzun zincirli hidrokarbona bağlı CTA^+ iyonları arasındaki yoğun etkileşimleri de gösterebilir (Gürses ve diğerleri 2015, Wanyika ve diğerleri 2016, Gürses ve Şahin 2023).

Şekil 25, saf melamin formaldehit köpüğü (MFK) ve MF-organo kil nanokompozit köpüğünün (MFKNKK) XRD difraktogramlarını göstermektedir.

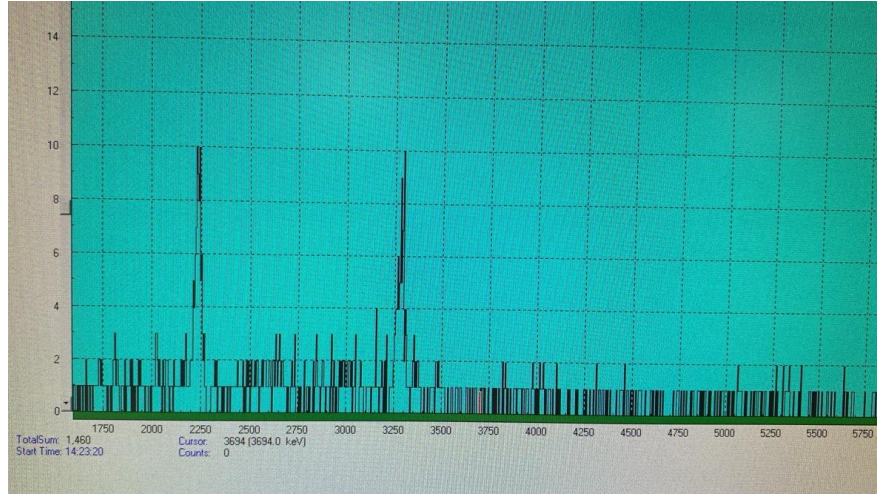


Şekil 25. Melamin formaldehit köpüğü (MFK) ve melamin formaldehito organo kil nanokompozit köpüğünün (MFKNKK) XRD difraktogramları

Bu şekil, MF reçinesinin XRD difraktogramında $9,4^\circ$ ve $23,8^\circ$ 'de görülen iki tipik geniş zirveyi göstermektedir, ki bu durum amorf bir yapıyı işaret etmektedir. Bu, melamin formaldehit reçinesinin metilol monomerlerinden oluştuğunu ve polimerik omurganın çoğalmasının gerçekleştiğini gösterir. Şekil 25'ten görülebileceği gibi, MF reçinesinin iki zirvesinden daha küçüğü, karakteristik bir smektit zirvesi olan $8,1^\circ$ ile kısmen örtüşmektedir (Gürses ve diğerleri 2015, Yu ve diğerleri 2014, Gürses ve Şahin 2023). Bu sola kaymış ve genişlemiş smektit piki, polimer moleküllerinin kilin ara tabaka alanına entegre olduğunu ve nanokompozitin oluştuğunu net bir şekilde gösterir. Şekil 23 b'deki HRTEM görüntüsü de bu iddiayı desteklemektedir.

Radyoaktivite Ölçümüne Dayalı Kinetik İncelemeler

Gama spektrumu, bir numunenin içindeki radyoaktif izotopların enerji dağılımını gösterir. Şekil 26'da U(VI) tarafından yayılan gama spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 26. U(VI)'nin gama spektrumu

Spektrum verilerinden bulgular, MFKNKK adsorbent için Tablo 4 ve MFK adsorbent için Tablo 5'te detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu tablolar, santrifüj sonrasında tüplerde bulunan numunenin dedektörde ölçülen ve çıkan sonuçlardan elde edilmiştir.

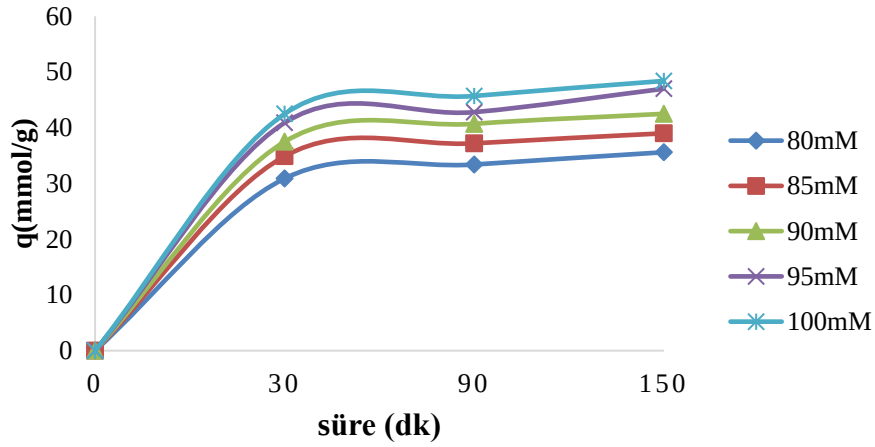
Tablo 4. MFKNKK Adsorbenti Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

30 dk				90 dk			150 dk		
C_b (mM)	C_d (mM)	q (mmol/g)	%R	C_d (mM)	q (mmol/g)	%R	C_d (mM)	q (mmol/g)	%R
80	49,1	30,9	38,6	46,6	33,4	41,8	44,4	35,6	44,5
85	50,1	34,9	41,1	47,8	37,2	43,8	46	39	45,9
90	52,5	37,5	41,7	49,3	40,7	45,2	47,5	42,5	47,2
95	54,1	40,9	43	52,2	42,8	54,9	48	47	49,5
100	57,5	42,5	42,5	54,3	45,7	45,7	51,6	48,4	48,4

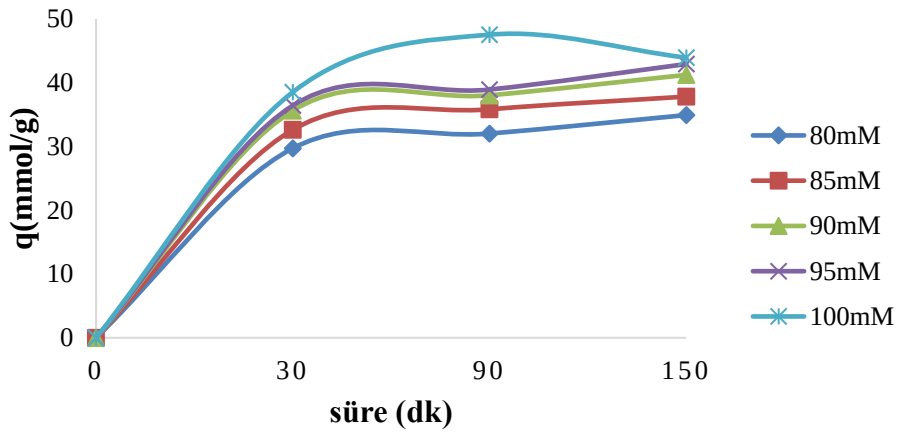
Tablo 5. MFK adsorbenti ile elde edilen veriler

30 dk				90 dk			150 dk		
C_b (mM)	C_d (mM)	q (mmol/g)	%R	C_d (mM)	q (mmol/g)	%R	C_d (mM)	q (mmol/g)	%R
80	50,3	29,7	37,2	48	32	40	45,1	34,9	43,6
85	52,4	32,6	38,4	49,2	35,8	42,1	47,2	37,8	44,5
90	54,4	35,6	39,5	52	38,0	42,2	48,8	41,2	45,8
95	58,6	36,4	38,3	56,1	38,9	40,9	52,1	42,9	45,2
100	61,5	38,5	38,5	58,5	47,5	47,5	56,1	43,9	43,9

Toz (MFKNKK) ve toz (MFK) tarafından adsorbe edilen U(VI) miktarındaki süre ile değişiminin incelendiği deneylerden elde edilen sonuçlar, sırasıyla, Şekil 27'a ve b'de başlangıç U(VI) konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir.



(a)



(b)

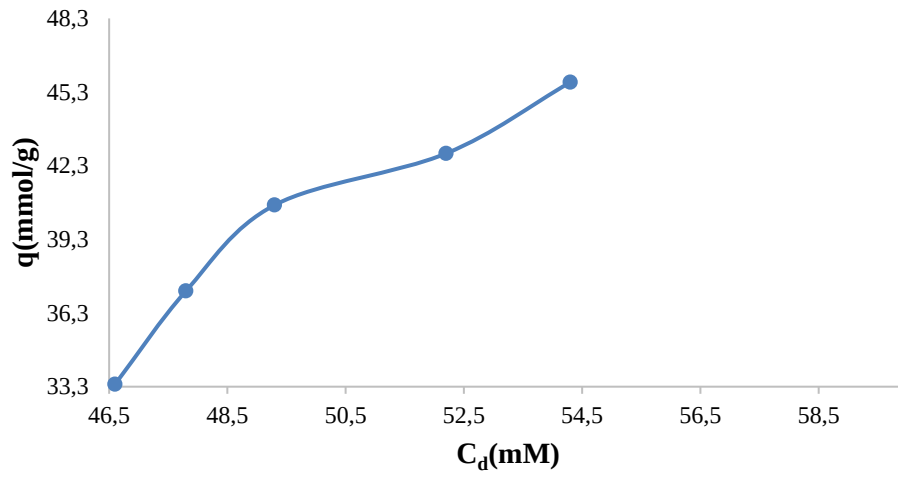
Şekil 27. Başlangıç U(VI) konsantrasyonu fonksiyonu olarak adsorbe edilen miktarın adsorpsiyon zamanına bağlı grafiği. a) MFKNKK adsorbent b) MFK adsorbent

MFKNKK adsorbentinde, düşük konsantrasyonlarda ilk 30 dakikada hızlı bir artış gözlemlenirken, adsorpsiyon kapasitesi yaklaşık 90 dakikada dengeye ulaşmaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda ise 80-100 mM arası konsantrasyonlar incelendiğinde, düşük konsantrasyonlarda hızlı bir artış görülmekte ve ardından dengeye ulaşıldığında küçük dalgalanmalar ile yüksek seviyede kalmaktadır. Bu, düşük konsantrasyonda boş aktif merkezlerin hızlıca kaplandığını ve belirli bir noktada doygunluğa ulaşıldığını göstermektedir. Genel olarak, MFKNKK adsorbenti düşük konsantrasyonlarda daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olup, doygunluğa hızlıca ulaşmaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda ise adsorpsiyon kapasitesi doygunluk seviyesine yakın değerlerde sabitlenmektedir.

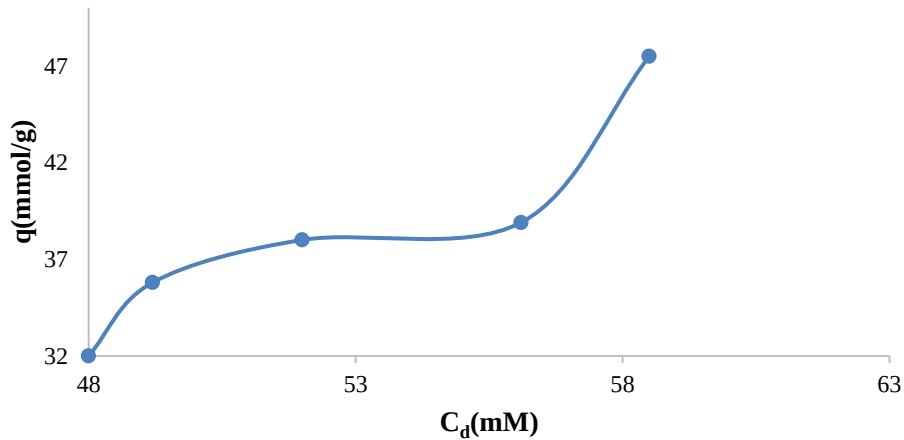
MFK adsorbentinde de benzer şekilde, düşük konsantrasyonlarda, adsorplanan miktarlar, ilk 30 dakikada hızlı bir artış sergilemekte ve adsorpsiyon yaklaşık 90 dakikada dengeye ulaşmaktadır. Yüksek konsantrasyonlarda ise 80-100 mM arası konsantrasyonlar incelendiğinde, düşük konsantrasyonlarda hızlı bir artış görülmekte ve ardından dengeye ulaşarak sabit bir seviyeye ulaşmaktadır. Genel olarak, MFK adsorbenti de düşük konsantrasyonlarda daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olup, konsantrasyon arttıkça adsorplanan miktar değişmemekte ve belirli bir dengeye ulaşmaktadır.

Her iki adsorbent için de denge süresi yaklaşık 90 dakikadır. Bu süreden sonra adsorpsiyon kapasitesi büyük ölçüde sabit kalmaktadır. MFKNKK adsorbenti, MFK adsorbentine kıyasla genellikle daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olup, uranyum adsorpsiyonu için daha etkili bir adsorbent olduğunu göstermektedir.

Şekil 28'deki grafikler, MFKNKK ve MFK adsorbentlerinin 25°C'deki adsorpsiyon izotermelerini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 28. Denge süresindeki konsantrasyona karşı şiddet a) MFKNKK adsorbenti b) MFK adsorbenti

Bu grafikler, sabit sıcaklıkta, adsorpsiyon kapasitesinin (q , mmol/g) çözeltinin denge konsantrasyonu (C_d , mM) ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Grafikte, denge konsantrasyonu arttıkça adsorpsiyon kapasitesinin arttığı gözlemlenmektedir. Bu artış, MFKNKK adsorbentinin uranyum iyonlarını etkili bir şekilde adsorbe edebildiğini ve çözeltideki uranyum konsantrasyonu arttıkça daha fazla uranyum iyonunun adsorbent yüzeyine bağlandığını göstermektedir. İlk başta yoğun bir artış gözlemlenirken, daha yüksek denge konsantrasyonlarında artma eğilimi daha az yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu durum, adsorbent yüzeylerinin doygunluğa yaklaştığını ve belirli bir noktadan sonra adsorpsiyon kapasitesinin azaldığını gösterir.

Şekil 28 b’de denge konsantrasyonu arttıkça adsorpsiyon kapasitesi artmaktadır. Ancak, MFK adsorbentinin adsorpsiyon kapasitesi MFKNKK adsorbentine göre daha düşük seviyede kalmaktadır. Bu, MFK adsorbentinin uranyum iyonlarını adsorbe etme kapasitesinin MFKNKK’ya kıyasla daha az olduğunu göstermektedir. İlk başta hızlı bir artış görülürken, daha yüksek denge konsantrasyonlarında bu artış yavaşlamaktadır. Ancak, MFK adsorbentinde belirli bir noktada tekrar hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Bu durum, MFK adsorbent yüzeyinde bazı yeniden düzenlemelerin veya daha etkili yüzey etkileşimlerinin meydana geldiğini ve bu nedenle adsorpsiyon kapasitesinin yeniden arttığını gösterebilir.

Her iki adsorbent de uranyum iyonlarını çözeltiden etkili bir şekilde uzaklaştırmaktadır. Ancak, MFKNKK adsorbenti daha yüksek bir adsorpsiyon kapasitesine sahip olup, MFK adsorbentinden daha etkilidir. Her iki grafikte de artan uranyum konsantrasyonu ile adsorpsiyon kapasitesinin arttığı ve belirli noktada doygunluğa ulaştığı gözlemlenmektedir.

UV-Vis Spektrofotometre Ölçümlerine Dayalı Kinetik İncelemeler

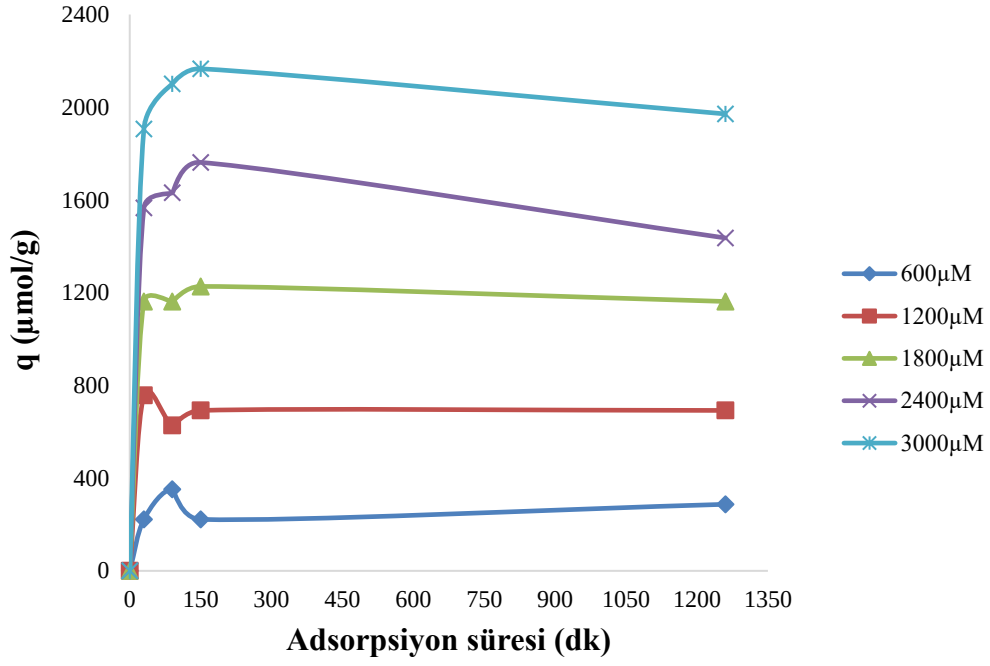
Toz (MFKNKK) ve toz (MFK) tarafından adsorbe edilen U(VI) miktarının süreyle değişiminin incelendiği deneylerden elde edilen sonuçlar, Şekil 29 a ve b’de başlangıç U(VI) konsantrasyonu fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Ayrıca her iki adsorbent için elde edilen veriler, MFKNKK ve MFK için sırasıyla, Tablo 6 ve 7’de gösterilmektedir.

Tablo 6. MFKNKK Adsorbentine Ait Kinetik Veriler

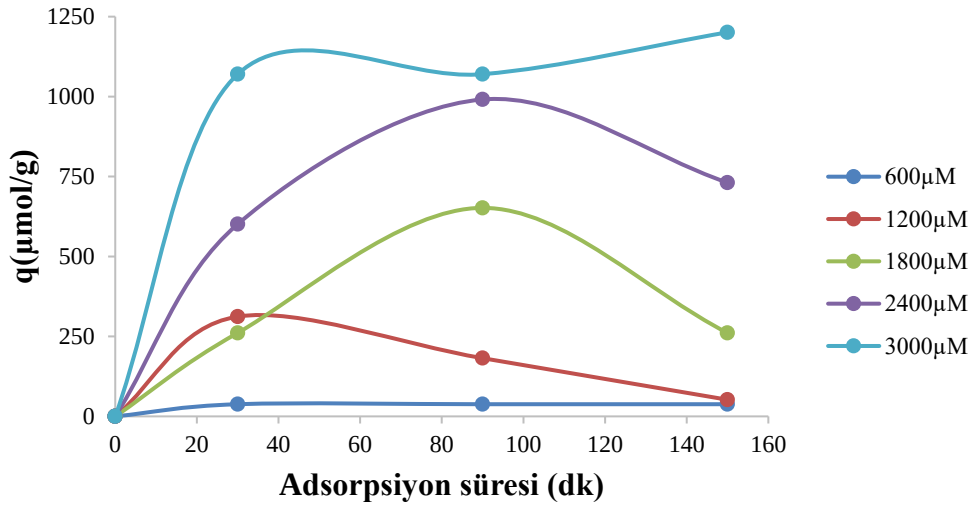
30 dk				90 dk			150 dk			2160 dk		
C _b	C _d	q	%R	C _d	q	%R	C _d	q	%R	C _d	q	%R
(μM)	(μM)	(μmol/g)		(μM)	(μmol/g)		(μM)	(μmol/g)		(μM)	(μmol/g)	
600	378	222	37	248	352	58,67	378	222	37	313	287	47,83
1200	443	757	63,08	573	627	52,25	508	692	57,67	508	692	57,67
1800	638	1162	64,56	638	1162	64,56	573	1227	68,17	638	1162	64,56
2400	834	1566	65,25	769	1631	67,96	638	1762	73,42	964	1436	59,83
3000	1094	1906	63,53	899	2101	70,03	834	2166	72,2	1029	1971	65,7

Tablo 7. MFK Adsorbentine Ait Kinetik Veriler

30 dk				90 dk			150 dk			2160 dk		
C _b	C _d	q	%R	C _d	q	%R	C _d	q	%R	C _d	q	%R
(μM)	(μM)	(μmol/g)		(μM)	(μmol/g)		(μM)	(μmol/g)		(μM)	(μmol/g)	
600	563	38	6,25	563	38	6,25	563	38	6,25	497	103	17,1
1200	888	312	26	1018	182	15,15	1148	52	4,3	888	312	26
1800	1539	261	14,5	1148	652	36,2	1539	261	14,5	1148	652	36,2
2400	1799	601	25,02	1409	991	41,3	1669	731	30,45	1539	861	35,87
3000	1930	1070	35,68	1930	1070	35,68	1799	1201	40,02	2060	940	31,34



(a)



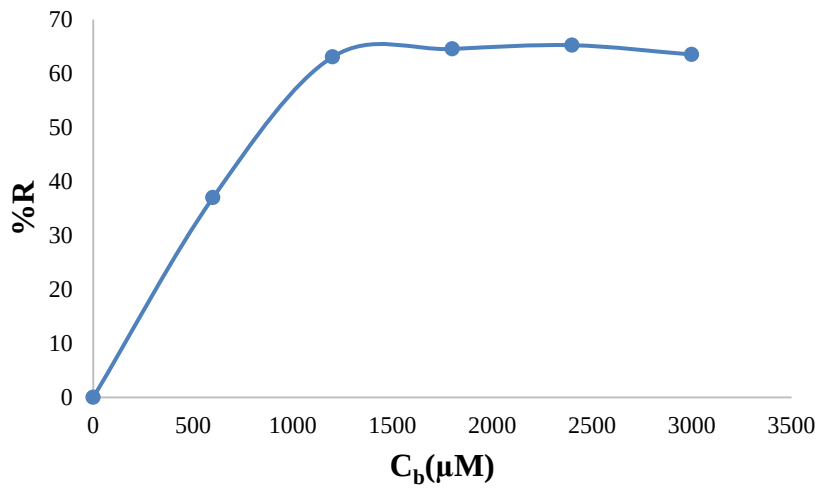
(b)

Şekil 29. Başlangıç U(VI) konsantrasyonu fonksiyonu olarak adsorbe edilen miktarın adsorpsiyon zamanına bağlı grafiği. a) MFKNKK b) MFK

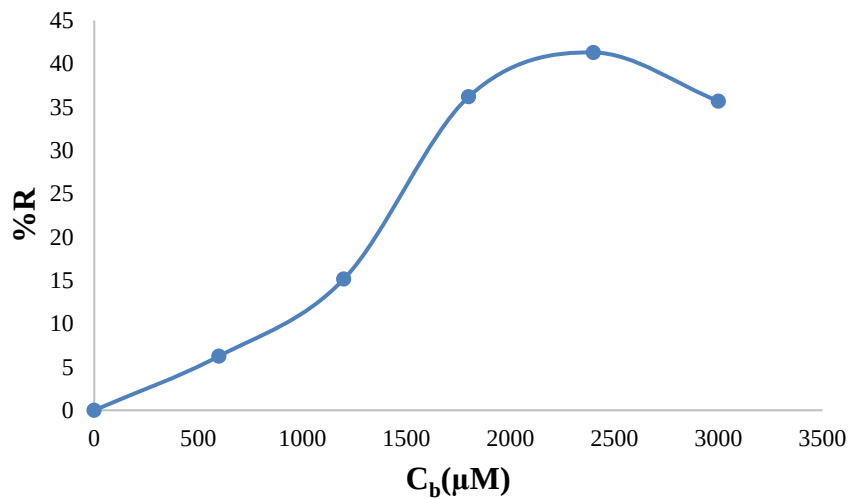
Şekil 29'dan görülebileceği gibi, U(VI) tarafından adsorbe edilen miktarlar, adsorpsiyon süresinin artmasıyla hızlıca arttı ve 90 dakikadan sonra neredeyse sabit kaldı. Aynı zamanda, aynı şekilden, başlangıç U(VI) konsantrasyonu arttıkça, 90 dakikalık sürede ortaya çıkan ve doygunluk adsorpsiyona karşılık gelen platoların giderek yükseldiği görülebilir. Bu nedenle, oldukça kısa bir süre olan 90 dakikanın, denge adsorpsiyonu için yeterli olduğu söylenebilir. Bu da gerçekleşen etkileşimlerin fiziksel olduğunu ima eder. Ayrıca, adsorpsiyonun ilk aşamasında U(VI) nin hızlı uzaklaştırılması, nanokompozit matrisinde U(VI) iyonlarının

etkileşimi için uygun çok sayıda aktif site bulunmasına bağlanabilir. Bu siteler muhtemelen polimer ağının triazin halkalarıdır ve U(VI) ile çok etkili bir şekilde etkileşime girebilir (pi elektronlarının polarizasyonu ile bağlanma), oksijen ve azo grupları (kompleksleşme) ve eksfoliasyonlu kil plakalarının yüzeyindeki hidrolize olmuş SiOH gruplarıdır (elektrostatik çekim). Başlangıç U(VI) konsantrasyonundaki değişimin doygunluğa ulaşmak için gereken süre üzerinde baskın bir etkisi olmadığından, denge adsorpsiyon süresi, adsorpsiyon dengeye ulaşıldığından emin olmak için sonraki deneylerde 90 dakika olarak alındı.

25°C için başlangıç U(VI) konsantrasyonu ile uzaklaştırma oranındaki değişim, Şekil 30'da gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 30. Başlangıç U(VI) konsantrasyonu ile uzaklaştırma oranının değişimi. a) MFKNKK b) MFK

Bu grafiklerden, MFKNKK üzerindeki U (VI)'nin çok yüksek bir uzaklaştırma oranıyla çok kısa bir adsorpsiyon süresinde uzaklaştırılabildiği ve uzaklaştırma oranının başlangıç konsantrasyonun artmasıyla çok fazla değişmediği görülebilir. Şekil 30 b'de MFK üzerindeki U (VI)'nin başlangıç uranyum konsantrasyonu arttıkça uranyum giderme yüzdesinin önce yükseldiğini, sonra belli bir noktada maksimuma ulaştığını ve sonrasında azaldığını göstermektedir. Bu durum, adsorbent yüzeylerinin dolduğunu ve daha fazla U (VI)'nin adsorbe edilemediğini göstermektedir. Sonuç olarak, optimal adsorpsiyon koşulları belirli bir konsantrasyon aralığında elde edilmiştir.

Adsorpsiyon kinetiği üzerine yapılan çalışmalar, adsorpsiyonun kontrol mekanizmalarının anlaşılmasında önemli bilgiler sunabilir. Genel olarak, adsorpsiyon, dış veya film difüzyonu, gözenek difüzyonu ve gözenek yüzeyindeki adsorpsiyon veya bu mekanizmaların bir kombinasyonu tarafından kontrol edilebilir. Bu nedenle, adsorpsiyon mekanizmasını öngörebilmek amacıyla, U(VI) adsorpsiyonu üzerine yapılan deneylerden elde edilen deneysel verilerin yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece ve intra partiküler difüzyon modelleri ile uyumluluğu da incelenmiştir (Lagergren ve diğerleri 1898, Ho ve diğerleri 1999).

Bu modellerin her biri farklı bir bakış açısı sunar. Yalancı birinci derece model, adsorpsiyonun birinci dereceden bir reaksiyona benzediğini ve adsorbentın doygunluğa ulaşma sürecini açıklamaya çalışır. Yalancı ikinci derece model, adsorpsiyonun ikinci dereceden bir reaksiyon olduğunu ve hızın adsorbat konsantrasyonuna bağlı olduğunu öne sürer. İnta partiküler difüzyon modeli ise adsorpsiyonun difüzyon sürecine bağlı olduğunu ve partikül içindeki difüzyon hızının proseste belirleyici olduğunu ileri sürer.

Bu modellerin deneysel verilerle uyumlu olup olmadığının incelenmesi, adsorpsiyonun hangi kontrol mekanizması altında gerçekleştiğini anlamak için önemlidir. Bu analizler, adsorbentın yüzey özellikleri ve adsorbatın kimyasal yapısı hakkında ek bilgiler sağlayabilir. Bu modellerin denklemlerinin lineer formları sırasıyla aşağıda verilmiştir:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (4)$$

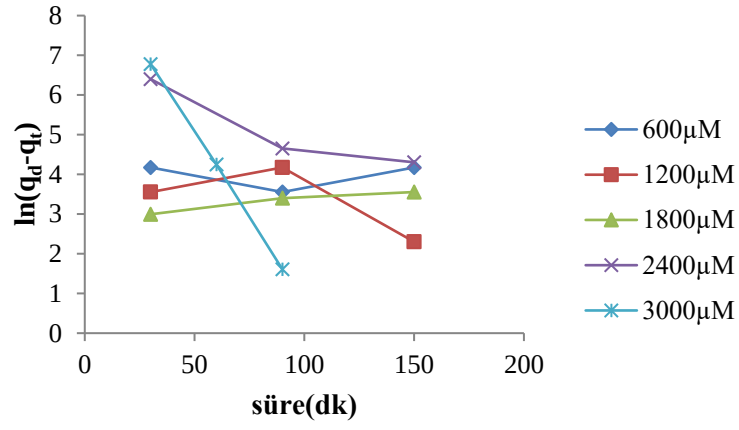
$$1/q_t = 1/k_2 q_e^2 + t/q_e \quad (5)$$

$$q_t = k_{id} \sqrt{t} + c \quad (6)$$

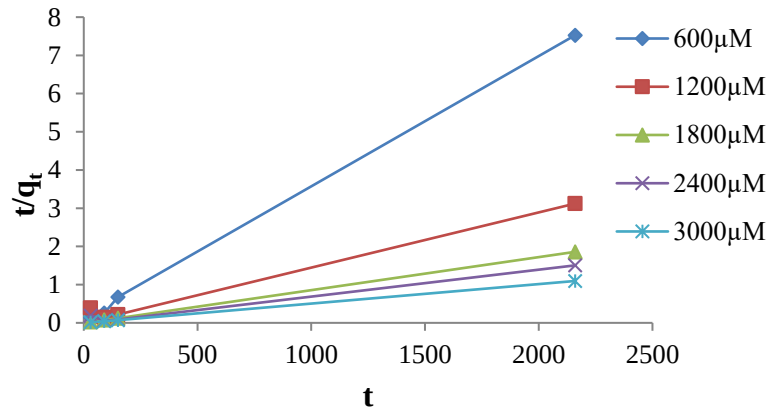
Burada q_e (mg/g), denge durumunda adsorbe edilen miktarı, q_t (mg/g), t zamanında adsorbe edilen miktarı, k_1 (min^{-1}), Yalancı birinci derece modelin hız sabiti, k_2 (g/mg min), Yalancı ikinci derece modelin hız sabiti, k_{id} (mg/g $\text{dk}^{-1/2}$), intra partiküler difüzyon modelin hız sabiti ve c , sınır tabaka kalınlığı ile ilgili bir sabittir.

Yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece ve intra partiküler difüzyon modellerinin grafikleri MFKNKK adsorbent ve MFK adsorbent için Şekil 31'de gösterilmiştir. Ayrıca, hesaplanan kinetik parametreler ve regresyon katsayıları da Tablo 8 ve 9 'da sunulmuştur.

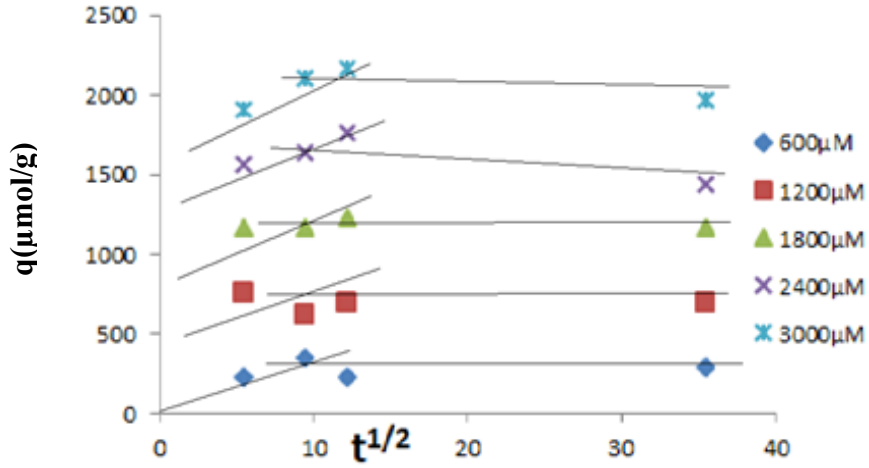
Şekil 31 c ve f'den, grafikteki eğrinin iki lineer bölüme ayrıldığı ve orijinden geçmediği gözlemlenmektedir. Bu durum, adsorpsiyon sürecinin hız kontrolü için tek bir adım olan intra-particle difüzyonunun yanı sıra diğer kontrol mekanizmalarının da etkili olabileceğini düşündürmektedir (Gürses ve diğerleri 2006, Foo ve diğerleri 2012). Grafikteki ilk bölümler, çözeltiden MFKNKK'nin ve MFK'nin dış yüzeyine doğru difüzyonu temsil edebilirken, ikinci bölümler, intra-particle difüzyon kontrolüne (gözenek difüzyonu ve gözenek yüzeyine adsorpsiyon) işaret edebilir. Lineer kısmın eğimi, adsorpsiyon hızını gösterir ve daha düşük bir eğim, daha yavaş bir adsorpsiyona işaret eder (Oguntimein ve diğerleri 2015, El Maguana ve diğerleri 2020). İlk bölümün eğimi, ikinci bölümün eğiminden daha yüksek olduğundan, U(VI) iyonlarının adsorbentin gözenekleri yerine sınır tabakasındaki dış yüzey üzerinde hızla adsorbe edildiği ve sadece doyumluğa ulaşıldığında MFKNKK ve MFK gözeneklerinin iç yüzeyinde adsorbe edildiği düşünülebilir. Ayrıca, deneysel verilerin Yalancı ikinci derecekinetik modeli ile uyumlu olması, çünkü Yalancı ikinci derece kinetiği, adsorbat ile adsorbent arasında güçlü etkileşimlerin veya yüksek bir afinite olasılığının varlığını gösterir (Hubbe ve diğerleri 2019, Ugbe ve diğerleri 2020).



(a)

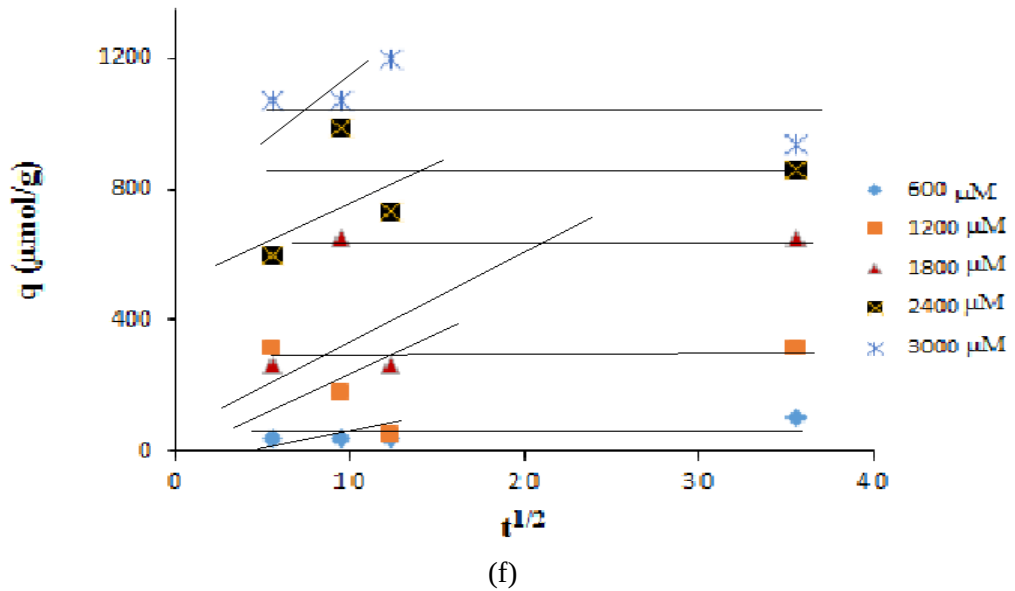
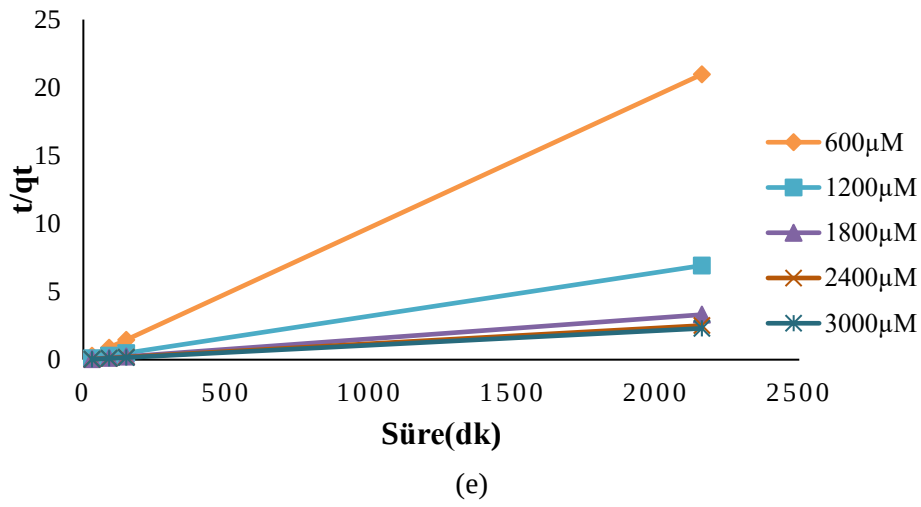
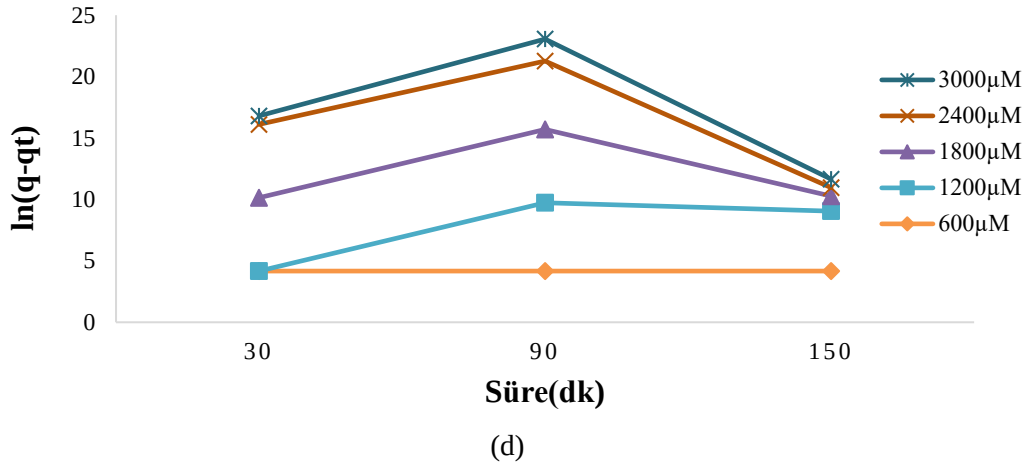


(b)



(c)

Şekil 31. DeneySEL verilerin (a) Yalancı birinci derece MFKNKK için, (b) Yalancı ikinci derece MFKNKK için ve (c) MFKNKK için intra partiküler difüzyon. (d) Yalancı birinci derece MFK için, (e) Yalancı ikinci derece MFK için ve (f) MFK için intra partiküler difüzyon modellerine uygunluğu için çizilen grafikler



Şekil 31. Deneysel verilerin (a) Yalancı birinci derece MFKNKK için, (b) Yalancı ikinci derece MFKNKK için ve (c) MFKNKK için intra partiküler difüzyon. (d) Yalancı birinci derece MFK için, (e) Yalancı ikinci derece MFK için ve (f) MFK için intra partiküler difüzyon modellerine uygunluğu için çizilen grafikler (devamı)

Bu grafiklerde, adsorpsiyon sürecinin farklı kinetik modellere uygunluğunu değerlendirmek amacıyla çizilmiş eğriler bulunmaktadır. Şekil 31'a ve d'de yalancı birinci derece modeli, Şekil 31 b ve e'de yalancı ikinci derece modeli ve Şekil 31 c ve f'de intra partiküler difüzyon modeli için çizilen grafiklerdir.

Ayrıca, bu modellere ait hesaplanan kinetik parametreler ve regresyon katsayıları Tablo 8 ve 9'da sunulmuştur. Bu tablolarda verilen sonuçlar, her bir modelin deneysel verilere ne kadar uygun olduğunu ve hangi modelin adsorpsiyon sürecini en iyi şekilde açıkladığını değerlendirmek için kullanılır.

Tablo 8. U(VI) adsorpsiyonu için toz MFKNKK üzerinde yalancı birinci derece ve yalancı ikinci derece ve intra partiküler difüzyon kinetik modelleri için hesaplanan kinetik parametreler (25°C, katı/sıvı oranı: 0,1/100 g/mL ve pH: 4,3)

C _{int} (µg L ⁻¹)	Sıcaklık K	Yalancı birinci derece		Yalancı ikinci derece		İntra partiküler difüzyon (birinci bölüm)		İntra partiküler difüzyon (ikinci bölüm)	
		k ₁	R ²	k ₂	R ²	k _{id,1} mg s ^{-1/2} g ⁻¹	R ²	k _{id,2} mg s ^{-1/2} g ⁻¹	R ²
600	298	-	-	0,03	0,999	39,14	0,969	6,32	0,826
1200	298	-	-	0,01	0,988	28,03	0,913	10,04	0,763
1800	298	-	-	0,01	1,000	11,24	0,653	1,09	0,171
2400	298	-	-	0,01	0,95	8,91	0,346	1,53	0,337
3000	298	-	-	0,01	1,000	2,34	0,011	0,44	0,009

Tablo 9. U(VI) adsorpsiyonu için toz MFK üzerinde yalancı birinci derece ve yalancı ikinci derece ve intra partiküler difüzyon modelleri için hesaplanan kinetik parametreler (25°C, katı/sıvı oranı: 0,1/100 g/mL ve pH: 4,3)

C _{int} (µg L ⁻¹)	Sıcaklık K	Yalancı birinci derece		Yalancı ikinci derece		İntra partiküler difüzyon (birinci bölüm)		İntra partiküler difüzyon (ikinci bölüm)	
		k ₁	R ²	k ₂	R ²	k _{id,1} mg s ^{-1/2} g ⁻¹	R ²	k _{id,2} mg s ^{-1/2} g ⁻¹	R ²
600	298	-	-	0,32	1,000	0,14	0,65	2,36	0,96
1200	298	-	-	0,005	1,000	37,97	0,99	3,1	0,11
1800	298	-	-	0,001	1,000	7,03	0,01	9,74	0,34
2400	298	-	-	0,001	1,000	24,83	0,18	4,19	0,11
3000	298	-	-	0,001	0,999	17,95	0,65	5,53	0,49

Bu grafikler ve tablolar incelendiğinde, sulu çözeltiden U(VI) giderimi için MFKNKK ve MFK tarafından gerçekleştirilen adsorpsiyonun kinetiğinin en iyi şekilde Yalancı ikinci derece modeli ile açıklanabileceği görülmektedir. Bu durum, MFKNKK ve MFK yüzeyindeki katyonik U(VI) iyonları ile aktif siteler arasında son derece etkili etkileşimlerin bulunduğu iddiasını desteklemektedir.

Adsorpsiyon İzotermi ve Sıcaklığın Etkisi

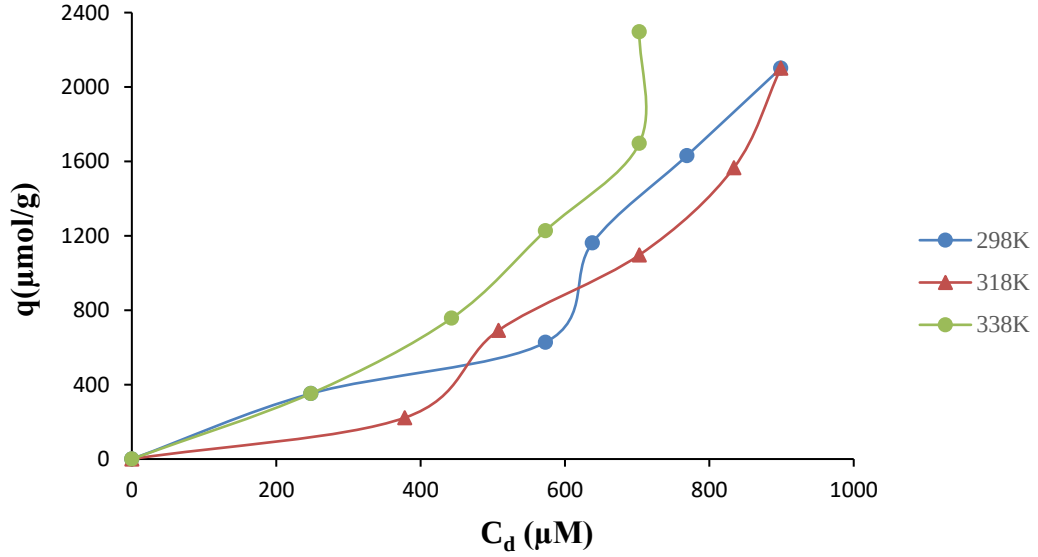
Adsorpsiyon izotermi, adsorbat partiküllerinin adsorbent yüzeyi ile etkileşimlerinin doğası, adsorbentin adsorpsiyon kapasitesi, adsorpsiyon verimliliği ve etkinliği, aynı zamanda adsorbat partiküllerinin yüzeydeki yönlendirmesi hakkında kritik bilgiler sunar. Bu bilgiler, adsorpsiyon mekanizmasını anlamak bakımından da son derece önemlidir. Bu çalışmada, deneysel adsorpsiyon izotermi, 25, 45 ve 65°C'de üç farklı sıcaklık için çizilmiş ve Şekil 32'de gösterilmiştir. Ayrıca, ilgili veriler Tablo 10 ve 11'de sunulmuştur.

Tablo 10. MFKNKK Adsorbent İçin Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Veriler

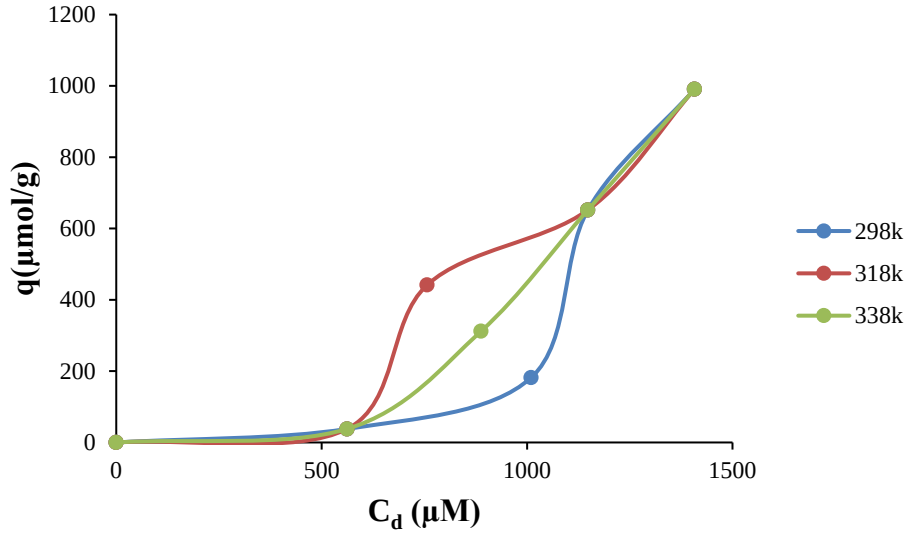
298 K				318 K			338 K		
C _b	C _d	q	%R	C _d	q	%R	C _d	q	%R
(μM)	(μM)	(μmol/g)		(μM)	(μmol/g)		(μM)	(μmol/g)	
600	248	352	58,67	378	222	37	248	352	58,67
1200	573	627	52,25	508	692	57,67	443	757	63,08
1800	638	1162	64,56	703	1097	60,94	573	1227	68,17
2400	769	1631	67,96	834	1566	65,25	703	1697	70,71
3000	899	2101	70,03	899	2101	70,03	703	2297	76,57

Tablo 11. MFK Adsorbent İçin Farklı Sıcaklıklarda Elde Edilen Veriler

298 K				318 K			338 K		
C _b	C _d	q	%R	C _d	q	%R	C _d	q	%R
(μM)	(μM)	(μmol/g)		(μM)	(μmol/g)		(μM)	(μmol/g)	
600	563	38	6,25	563	38	6,25	563	38	6,25
1200	1018	182	15,15	758	442	36,85	888	312	26
1800	1148	652	36,2	1148	652	36,2	1148	652	36,2
2400	1409	991	41,3	1409	991	41,3	1409	991	41,3
3000	1409	1591	53,04	1409	1591	53,04	1409	1591	53,04



(a)



(b)

Şekil 32. Üç farklı sıcaklıktaki (25, 45 ve 65°C) deneysel adsorpsiyon izotermi (süre: 90 dk; katı/sıvı oranı: 0,1/100 g/mL, çalkalama hızı: 150 dk⁻¹ ve doğal pH: 4,3). a) MFKNKK adsorbenti için, b) MFK adsorbenti için

Şekil 32 a'dan, denge U(VI) konsantrasyonu arttıkça, adsorbe miktarlarının üç sıcaklık için de orta düzeyde denge U(VI) konsantrasyonlarına kadar oldukça düşük verimlilikle arttığı görülmektedir. Ancak, ilginç bir şekilde, 25°C ve 65°C'deki düşük konsantrasyonlardaki izoterm bölümleri örtüşmektedir ve hatta, 45°C'deki izoterm bölümü diğerlerinden daha küçük bir eğime sahiptir.

Yüksek U(VI) denge konsantrasyon aralığında, adsorpsiyon verimliliği üç sıcaklık için de daha yüksektir ve birbirlerine benzer bir davranış sergiler, ancak 65°C'deki izoterm eğimi, yani adsorpsiyon verimliliği, daha düşük sıcaklıklara kıyasla çok daha yüksektir. Sıcaklığın

genel olarak adsorpsiyon verimliliği ve etkinliğini büyük ölçüde etkilediğini ve adsorpsiyon mekanizmasının doğrudan sıcaklığa bağlı olduğunu gösteren artan sıcaklıkla gözlemlenen kısmi artış, bu bağlamda önemlidir. Dolayısıyla, düşük U(VI) konsantrasyonlarında adsorpsiyonun, polimer matrisin triazin halkalarının pi elektronlarının U(VI) iyonları tarafından polarizasyonundan kaynaklanan çekici etkileşimler aracılığıyla gerçekleştiği söylenebilir. Ayrıca, organo kil levhalarının hidrokarbon zincirlerinin steric engeline rağmen, MFKNKK'nin UO_2^{+2} iyonları ile hidrolize olmuş Si-OH grupları arasındaki elektrostatik çekim etkileşimleri de adsorpsiyonda etkili olduğu söylenebilir. Daha yüksek denge U(VI) konsantrasyonlarında gözlemlenen önemli artış, U(VI) adsorpsiyonunun etkinliğinde ve etkinliğinde olası bir değişikliği açıkça gösterir ve bu mekanizmanın muhtemelen polimer matrisindeki oksijen ve azo grupları ile UO_2^{+2} iyonları arasında kompleks oluşumuna dayandığı, adsorpsiyonun U(VI) konsantrasyonuna daha duyarlı olduğunu gösterir.

Şekil 32 b'de MFK adsorbentinin U(VI) gideriminde U(VI) konsantrasyonu arttıkça, adsorpsiyon kapasitesinin üç sıcaklık için de arttığı gözlenmektedir. Özellikle, düşük denge U(VI) konsantrasyonlarında, adsorpsiyon kapasitesi 25°C ve 65°C'de daha yüksek, 45°C'de ise nispeten düşük seviyededir. Yüksek denge U(VI) konsantrasyonlarında, adsorpsiyon verimliliği üç sıcaklıkta da artış göstermekte olup, en yüksek adsorpsiyon verimliliği 65°C'de görülmektedir. Bu durum, adsorpsiyon sürecinin sıcaklığa bağlı olarak değiştiğini ve daha yüksek sıcaklıkların adsorpsiyon kapasitesini artırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, MFK adsorbentinde de sıcaklık arttıkça adsorpsiyon verimliliği artmaktadır ve yüksek sıcaklıklarda U(VI) giderimi daha etkin bir şekilde gerçekleşmektedir.

Şekil 32 a ve b'yi karşılaştırarak, MFKNKK ve MFK adsorbentlerinin U(VI) giderim performanslarını değerlendirebiliriz. Her iki adsorbentin de yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmektedir. Ancak, genel olarak bakıldığında MFKNKK, yüksek denge U(VI) konsantrasyonlarında daha yüksek bir adsorpsiyon kapasitesi gösterdiği, MFK adsorbentinin ise, benzer koşullarda daha düşük bir adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle, MFKNKK adsorbentinin, genel olarak MFK adsorbentinden daha iyi bir performans ve özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek U(VI) konsantrasyonlarında daha etkin bir adsorpsiyon sergilediği söylenebilir.

U(VI) adsorpsiyonunu açıklamak için kullanılabilecek Freundlich izoterm denklemi ile Langmuir, Brunauer–Emmett–Teller (BET) Halsey, Harkins-Jura ve Smith izoterm modellerinin deneysel veri ile uyumluluğu da incelenmiştir. Langmuir, Brunauer-Emmett-Teller ve (BET), Halsey, Harkins-Jura ve Smith izoterm modelleri ile Freundlich izoterm denklemini içeren grafikler, Şekil 33 ve 34'te toplu olarak verilmiştir. Freundlich izoterm

denklemleri, deneysel bir denklemdir (El Maguana ve diğerleri 2020) ve BET adsorpsiyon izoterm modeli çok katmanlı adsorpsiyon varsayımlarına dayanır. Langmuir modeli, adsorplanmış iyonlar veya moleküller arasında bir etkileşim olmadığını ve adsorpsiyonun lokalize olduğunu, yani homojen bir yüzeyde monokatmanlı adsorpsiyonun gerçekleştiğini öne sürer. Öte yandan, Halsey izotermi, çok katmanlı adsorpsiyon ve heterojen gözeneklilikteki adsorbent varsayımlarına dayanarak adsorpsiyonun daha karmaşık bir yapıya sahip olduğunu ifade eder. Harkins-Jura izoterm modeli ise adsorbent yüzeyinde heterojen bir gözenek dağılımının varlığına dayanarak çok katmanlı adsorpsiyon olasılığını öngörür (Galamini ve diğerleri 2020). Smith adsorpsiyon izotermi, özellikle selülozan, naylon ve pamuk gibi bazı polimerik malzemelerin su adsorpsiyonunu tahmin etmek için kullanılmış olup s-şekilli izotermi doğru bir şekilde yorumlayabilir (Majd ve diğerleri 2022). Tüm izoterm modellerinin (Langmuir, Brunauer–Emmett–Teller (BET) Halsey, Harkins-Jura ve Smith izoterm modelleri) ve deneysel Freundlich denkleminin lineer formları sırasıyla Denklem 7-12’ de verilmiştir.

$$\ln q = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln K_f \quad (7)$$

$$C_e/q = 1/q_m K + C_e/q_m \quad (8)$$

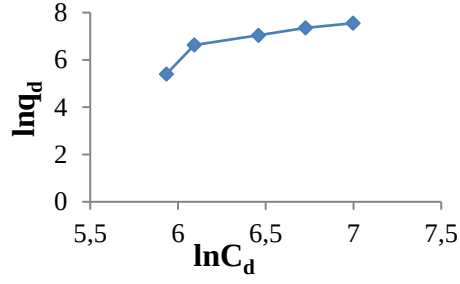
$$C/q(1 - C_e) = 1/q_m k + (k - 1)C_e/q_m k \quad (9)$$

$$q_e = 1/n_H \ln K_H - 1/n_H \ln C_e \quad (10)$$

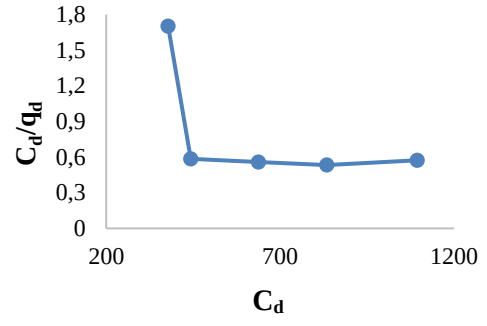
$$1/q^2 = (B/A) - 1/A \ln C_e \quad (11)$$

$$q = Wb - W \ln(1 - C_e) \quad (12)$$

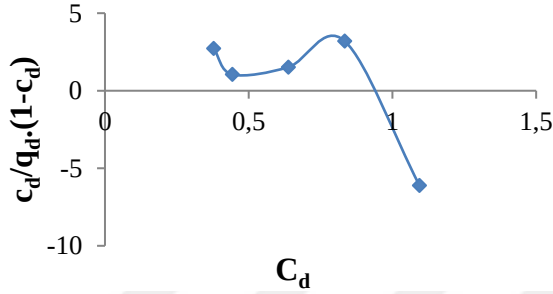
Burada C_e (μM), denge konsantrasyonu; q_e (mg/g), denge durumundaki adsorbe miktarı; q_m (mg/g), monokatman adsorpsiyon kapasitesi; n ve K_F , Freundlich sabitleri; K , Langmuir sabiti; k , BET parametresi; n_H ve K_H , Halsey sabitleri; A ve B , Harkins-Jura sabitleri; W_b ve W , Smith parametreleridir (Adusei ve diğerleri 2023, Gürses ve diğerleri 2023).



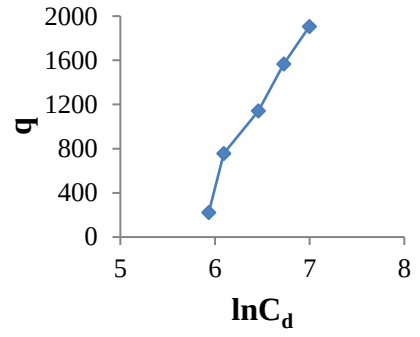
(a)



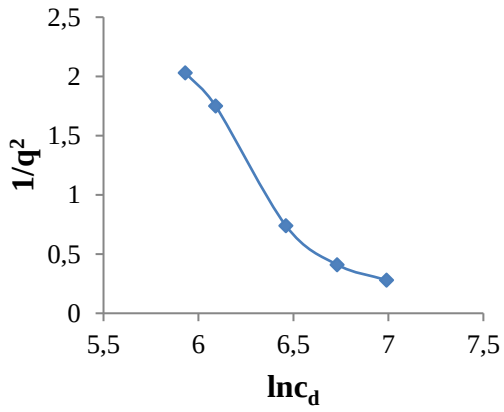
(b)



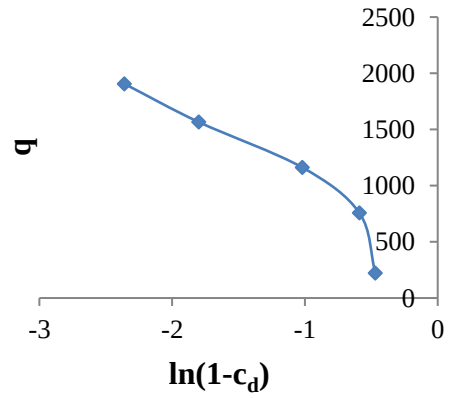
(c)



(d)

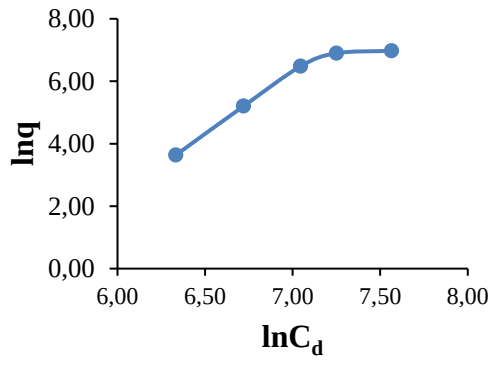


(e)

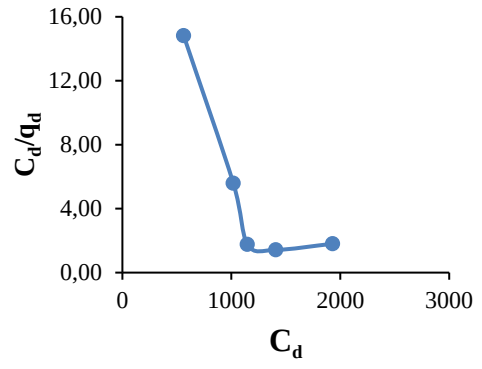


(f)

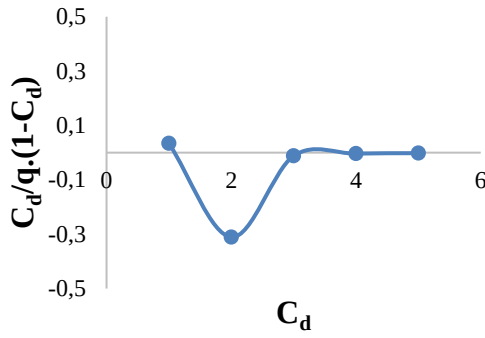
Şekil 33. MFKNKK için Freundlich izoterm denklemine (a), Langmuir modeline (b), Brunauer–Emmett–Teller (BET) modeline (c), Halsey modeline (d), Harkins-Jura modeline (e) ve Smith modeline(f) ait izotermmler



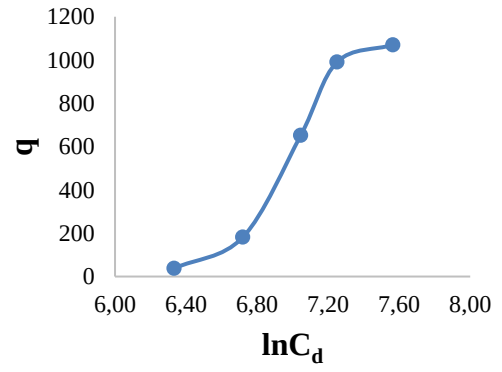
(a)



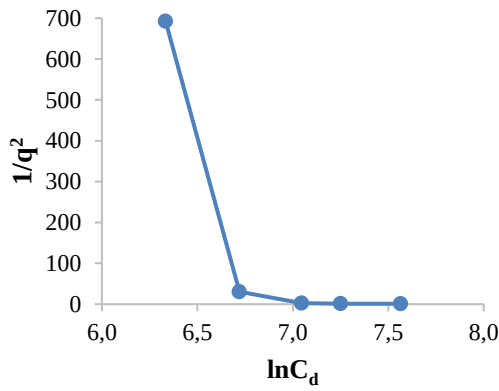
(b)



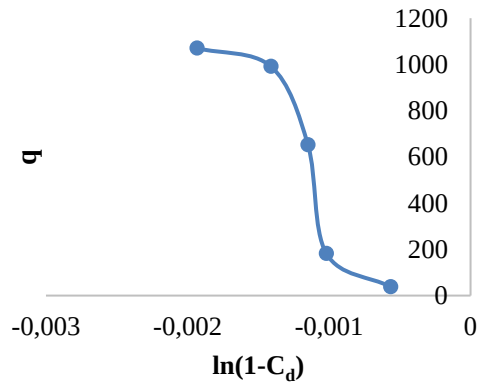
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 34. MFK için Freundlich izoterm denkleminde (a), Langmuir modeline (b), Brunauer–Emmett–Teller (BET) modeline (c), Halsey modeline (d), Harkins-Jura modeline (e) ve Smith modeline(f) ait izotermeler

Tablo 12. MFKNKK Adsorbenti İçin, Freundlich İzoterm Denkleminin Lineer Denklemi(a), Langmuir Modelinin Lineer Denklemi (b), Brunauer–Emmett–Teller (BET) Modelinin Lineer Denklemi (c), Halsey Modelinin Lineer Denklemi (d), Harkins-Jura Modelinin Lineer Denklemi (e) ve Smith Modelinin Lineer Denklemi (f) İle İlgili İzoterm Sabitleri ve Regresyon Katsayıları

İzoterm denklemleri	Sabit parametre		Regresyon katsayıları(R ²)
Freundlich	n	0,569	0,8110
$\ln q = 1/n \ln C_e + \ln K_f$	K _f	1,506	
Langmuir	q _m	1000	0,3352
$C_e/q = 1/q_m K + C_e/q_m$	K	0,001	
BET	q _m	5,649	0,5088
$C/q(1-C_e) = 1/q_m k + (k-1)C_e/q_m k$	k	1,170	
Halsey	n _H	0,0005	0,9734
$q_e = 1/n_H \ln K_H - 1/n_H \ln C_e$	K _H	1,445	
Harkins-Jura	A	0,566	0,9431
$1/q^2 = (B/A) - 1/A \ln C_e$	B	7,031	
Smith	W _b	-327,3	0,7137
$q = W_b - W \ln(1-C_e)$	W	564,5	

Tablo 13. MFK Adsorbenti için, Freundlich İzoterm Denkleminin Lineer Denklemi(a), Langmuir Modelinin Lineer Denklemi (b), Brunauer–Emmett–Teller (BET) Modelinin Lineer Denklemi (c), Halsey Modelinin Lineer Denklemi (d), Harkins-Jura Modelinin Lineer Denklemi (e) ve Smith Modelinin Lineer Denklemi (f) İle İlgili İzoterm Sabitleri ve Regresyon Katsayıları

İzoterm denklemleri	Sabit parametre		Regresyon katsayıları(R ²)
Freundlich	n	0,35	0,912
$\ln q = 1/n \ln C_e + \ln K_f$	K _f	1,289	
Langmuir	q _m	12,39	0,6501
$C_e/q = 1/q_m K + C_e/q_m$	K	0,005	
BET	q _m	8,89	0,0689
$C/q(1-C_e) = 1/q_m k + (k-1)C_e/q_m k$	k	-0,91	
Halsey	n _H	0,0001	0,9352
$q_e = 1/n_H \ln K_H - 1/n_H \ln C_e$	K _H	0,157	
Harkins-Jura	A	22,46	0,6149
$1/q^2 = (B/A) - 1/A \ln C_e$	B	82,373	
Smith	W _b	-435,31	0,8337
$q = W_b - W \ln(1-C_e)$	W	-841468	

25°C'deki deneysel verilerle çizilen izoterm eğrisi, zayıf etkileşimleri, çok katmanlı adsorpsiyonu ve heterojen gözenek boyutu dağılımına sahip adsorbent yapısını tanımlayan Tip III izoterm tipine uygun bir yapı göstermektedir. Ancak, mevcut adsorpsiyon sisteminde, adsorbent yüzey özellikleri ve adsorbatın iyonik yapısı nedeniyle çok katmanlı adsorpsiyon olasılığı bulunmamaktadır. Bu nedenle, Tip III izotermelerde denge adsorbat konsantrasyonunun orta düzeydeki değerlere ulaştıktan sonra tahmin edilen çok katmanlı bir yapıyı ima eden yüksek adsorpsiyon, MFKNKK ve U(VI) adsorpsiyon sisteminde kompleksleşme şeklindeki mekanizma değişiminden kaynaklanan etkili adsorpsiyona bağlanabilir. Tablo 12'den, deneysel verilerin genellikle çok katmanlı adsorpsiyonun heterojen yüzey özelliklerini öngören modellerle uyumlu olduğu, ancak en yüksek uyumun Halsey izoterm modeli ile elde edildiği görülebilir. Benzer şekilde MF adsorbentine ait adsorplanmanın da Tablo 13'te görüldüğü gibi Halsey izoterm modeli ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Adsorpsiyon Termodinamiği

Toz MFKNKK üzerinde U(VI) adsorpsiyonunun doğasını ve termodinamik özelliklerini incelemek için, izoterm eğrilerindeki ilk ve ikinci platolarla ilişkili adsorbe miktarları için iki ayrı izosterik standart adsorpsiyon entalpisi (ΔH°) ve entropi (ΔS°) hesaplandı. Bu amaçla, sabit adsorpsiyona karşılık gelen iki farklı sıcaklıkta, yani izoterm eğrilerindeki platoların oluşumu için 25 ve 65°C'de denge U(VI) konsantrasyonları dikkate alınarak hesaplama yapıldı (Denklemler 13 ve 14).

$$d \ln C_e / d(1/T) = -\Delta H^\circ_{ads} / R \quad (13)$$

$$d \ln C_e / d \ln T = \Delta S^\circ_{ads} / R \quad (14)$$

Burada C_e denge konsantrasyonunu (mM) ifade eder, R gaz sabitini (8,3214 J/Kmol) ve T mutlak sıcaklığı (K) temsil eder.

İzosterik adsorpsiyon entalpisi, ΔH°_{ads} , ve izosterik adsorpsiyon entropisi, ΔS°_{ads} , sırasıyla $\ln C_e$ 'ye karşı $1/T$ ve $\ln C_e$ 'ye karşı $\ln T$ eğrilerinin eğimlerinden bulundu, elde edilen değerler Tablo 14 ve 15'te dağılım katsayıları (D) ile birlikte verilmiştir.

Tablo 14. MFKNKK Adsorbent İçin İzosterik Adsorpsiyon Entalpisi, $\Delta H^{\circ}_{\text{ads}}$, İzosterik Adsorpsiyon Entropisi $\Delta S^{\circ}_{\text{ads}}$ Değerleri ve İzoterm Eğrilerindeki İlk ve İkinci Platolara Karşılık Gelen Dağılım Katsayıları

Sıcaklık K	$\Delta H^{\circ}_{\text{ads}}$ (kJ/mol) (İlk plato)	D_1	$\Delta H^{\circ}_{\text{ads}}$ (kJ/mol) (İkinci plato)	D_1	$\Delta S^{\circ}_{\text{ads}}$ (J/mol K) (İlk plato)	D_2	$\Delta S^{\circ}_{\text{ads}}$ (J/molK) (İkinci plato)	D_2
298	3,65	1,08	-51,02	3,59	1,77	1,71	-167,28	5,92
338								

Tablo 15. MFK Adsorbent İçin İzosterik Adsorpsiyon Entalpisi, $\Delta H^{\circ}_{\text{ads}}$, İzosterik Adsorpsiyon Entropisi $\Delta S^{\circ}_{\text{ads}}$ Değerleri ve İzoterm Eğrilerindeki İlk ve İkinci Platolara Karşılık Gelen Dağılım Katsayıları

Sıcaklık (K)	$\Delta H^{\circ}_{\text{ads}}$ (kJ/mol) (İlk plato)	D_1	$\Delta H^{\circ}_{\text{ads}}$ (kJ/mol) (İkinci plato)	D_1	$\Delta S^{\circ}_{\text{ads}}$ (J/mol K) (İlk plato)	D_2	$\Delta S^{\circ}_{\text{ads}}$ (J/molK) (İkinci plato)	D_2
298	3,12	1,01	-53,01	3,68	1,08	1,68	-153,29	5,11
338								

Tablo 14 ve 15'te hesaplanan verilere göre birinci plato oluşumuna karşılık gelen çok küçük ve pozitif entalpi değişimi değeri ile çok küçük ve pozitif entropi değişimi değeri, adsorpsiyonun doğasının endotermik ve adsorpsiyonda pi-elektronlarının polarizasyonuna dayalı mekanizmanın baskın olduğunu, dolayısıyla bağlamanın düzensizlik ürettiğini işaret eder. Diğer taraftan, ikinci plato oluşumuna karşılık gelen nispeten yüksek ve negatif entalpi değişimi değeri ile nispeten yüksek ve negatif entropi değişimi değeri, adsorpsiyonun kompleks oluşumu mekanizmasıyla, UO_2^{+2} iyonları ile oksijen grupları arasındaki daha güçlü etkileşimlerle gerçekleştiğini ve böylece daha düzenli bir yapılanmanın oluşumunu ima eder. Ayrıca, hesaplanan büyük dağılım katsayıları da bu değerlendirmelerle paralellik göstermektedir.

pH Etkisi

pH değişiminin adsorpsiyon üzerine etkisinin incelendiği deneylerden elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak Tablo 16 ve 17'de verilmiştir.

Tablo 16. MFKNKK Adsorbentine Ait Sonuçlar ($C_b=3000 \mu\text{M}$)

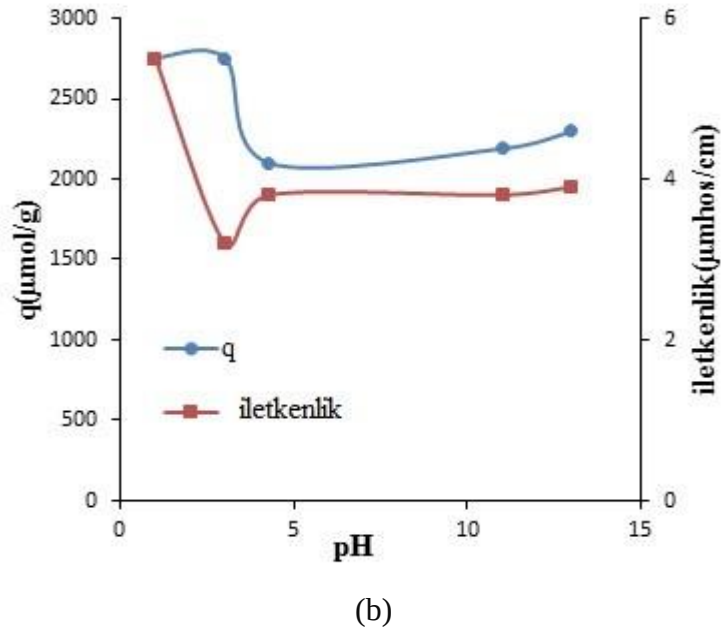
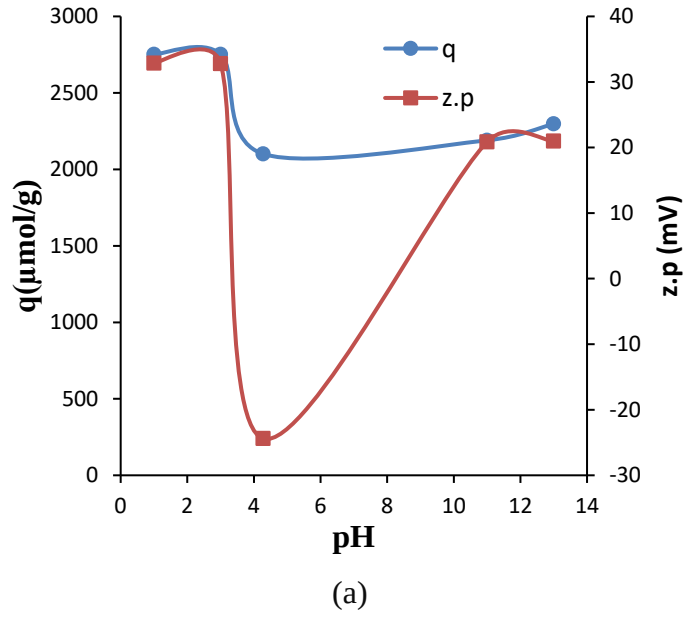
pH	C_d	q	%R	Zeta potansiyel	İletkenlik
	(μM)	($\mu\text{mol/g}$)		mV	($\mu\text{mhos/cm}$)
1,0	248	2752	91,73	32,86	5,5
3,0	248	2752	91,73	32,79	3,2
4,3	899	2101	70,03	-24,4	3,8
11,0	810	2190	73	20,85	3,8
13,0	703	2297	76,56	20,97	3,9

Tablo 17. MFK Adsorbentine Ait Sonuçlar ($C_b=3000 \mu\text{M}$)

pH	C_d	q	%R	Zeta potansiyel	İletkenlik
	(μM)	($\mu\text{mol/g}$)		mV	($\mu\text{mhos/cm}$)
1,0	497	25026	83,42	42,28	6,2
3,0	497	25026	83,42	32,28	16,4
4,3	1409	15911	53,4	-14,1	15,3
11,0	2190	8099	27	28,77	14,6
13,0	1669	13307	44,36	30,63	4,4

Sulu süspansiyonlarda yüksek oranda yüklü gruplara sahip olabilen katı yüzeyler, özellikle pH, iyonik kuvvet ve sıcaklık gibi çevresel koşullara son derece duyarlıdır. Bu durum, genellikle yüklü katı adsorbentlere iyonik maddelerin adsorpsiyonunda belirgin değişikliklere neden olur.

MFKNKK adsorbentinin kullanımında adsorplanan miktarın, zeta potansiyel değerlerinin ve elektriksel iletkenlik değerlerinin başlangıç pH'sına bağlı olarak değişimi Şekil 35 a ve b'de görülmektedir.



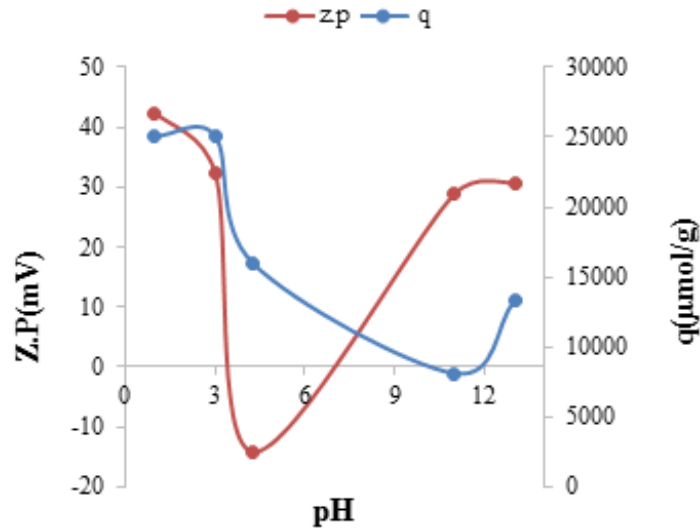
Şekil 35. MFKNKK adsorbenti için, (a) başlangıç pH'sına bağlı olarak adsorplanan miktarın ve zeta potansiyel değerlerinin değişimi ve (b) başlangıç pH'sına bağlı olarak adsorplanan miktarın ve elektriksel iletkenlik değerlerinin değişimi (Başlangıç konsantrasyonu: 1200 μ M, sıcaklık: 25°C, süre: 90 dk, katı/sıvı oranı: 0,1g/100 mL ve çalkalama hızı: 150 dk⁻¹)

Sulu çözeltinin pH'sı yükseldikçe, genellikle katı yüzeyi, çözeltiden yüklü bölgelere proton adsorpsiyonu nedeniyle daha pozitif veya daha az negatif bir hale gelir. Bu grafiklerden, pozitif UO_2^{+2} iyonlarının düşük pH'larda daha yoğun bir şekilde adsorbe edildiği ve zeta potansiyel değerlerinin aynı oranda daha yüksek pozitif değerlere ulaştığı gözlemlenirken, artan iyon türü adsorpsiyonunun elektriksel iletkenlik değerlerini azalttığı söylenebilir.

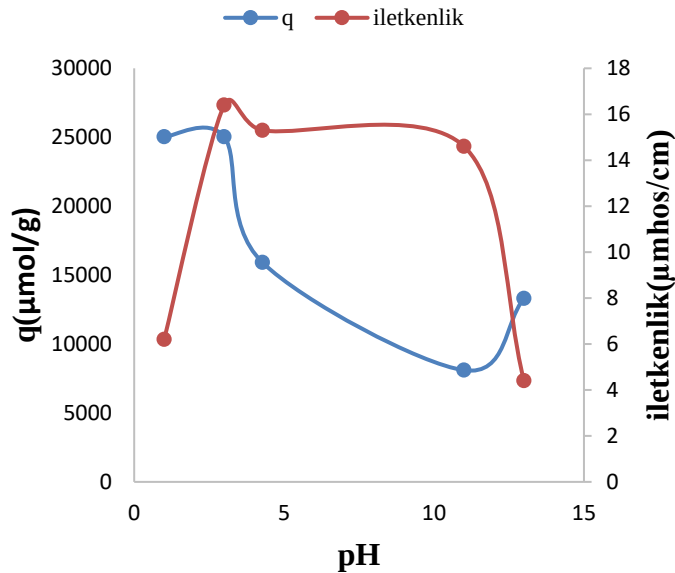
Bu şekillerden, doğal pH olan 4,3'te, adsorpsiyon ve zeta potansiyel değerlerinin azaldığı, ancak elektriksel iletkenlik değerlerinin süspansiyondaki uranyum iyonlarının hidroliz ürünlerinin ($\text{UO}_2(\text{OH})^+$ ve $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ formunda) konsantrasyonundaki artış nedeniyle kısmen

arttığı görülmektedir. Diğer bir taraftan, çok yüksek pH'larda, $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ hidroliz ürününün baskın olması ve iyon türlerinin polimer yüzeyinde çökeltme yoluyla süspansiyondan uzaklaştırılması nedeniyle, adsorbe miktarının göreceli olarak arttığı ve zeta potansiyel ile elektriksel iletkenlik değerlerinin azalmaya ve sabit kalmaya eğilimli olduğu gözlemlenmiştir.

MFK adsorbenti için adsorplanan miktarın, zeta potansiyel değerlerinin ve elektriksel iletkenlik değerlerinin başlangıç pH'sına bağlı olarak değişimi Şekil 36 a ve b'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 36. MFK adsorbenti için (a) başlangıç pH'sına bağlı olarak adsorplanan miktarın ve zeta potansiyel değerlerinin değişimi ve (b) başlangıç pH'sına bağlı olarak adsorplanan miktarın ve elektriksel iletkenlik değerlerinin değişimi (Başlangıç konsantrasyonu: 1200 μM , sıcaklık: 25°C, süre: 90 dk, katı/sıvı oranı: 0,1g/100 mL ve çalkalama hızı: 150 dk^{-1})

Şekil 36 a, adsorplanan miktarın ve zeta potansiyel değerlerinin başlangıç pH'sıyla değişimini göstermektedir. Bu şekilden, adsorplanan miktarın başlangıç pH'sına yüksekçe bağlı olduğu, düşük pH değerlerinde, uranyum iyonlarının adsorbent yüzeyindeki aktif merkezler ile daha yoğun etkileşime girdiği ve bunun da yüksek bir adsorpsiyon kapasitesi ile sonuçlandığı görülmektedir. Orta pH değerlerinde adsorplanan miktarı azalmakta ve bu durum yüzey yüklerinin ve çözeltideki diğer pozitif yüklü iyonların adsorpsiyondaki rekabetiyle açıklanabilir. Daha yüksek pH değerlerinde ise adsorpsiyon miktarı tekrar artış gösterir, bu da uranyumun yüksek pH koşullarında farklı iyonik formlarda ya da hidroliz olmasıyla ilişkilendirilebilir. Zeta potansiyelinin pH'ya bağlı olarak değişimi de bu açıklamayı destekler. Zeta potansiyel değerlerinin negatiften pozitifte geçişi, yüzeydeki yüklü merkezlere uranyum iyonlarının yüksekçe adsorpsiyonun bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

Şekil 36 b adsorplanan miktarın ve elektriksel iletkenlik değerlerinin başlangıç pH'sıyla değişimini göstermektedir. Adsorplanan miktar, artan pH ile yine benzer bir değişim göstermektedir. Düşük pH değerlerinde yüksek adsorpsiyon kapasitesi, orta pH değerlerinde azalma ve yüksek pH değerlerinde ise tekrar artış gözlemlenmektedir. Elektriksel iletkenlik, çözeltideki iyonik türlerin miktarını ve hareketliliğini yansıtır. Düşük pH değerlerinde düşük olan iletkenlik, çözeltideki serbest iyonların az olduğunu ve adsorpsiyonun yüksekliğini işaret eder. Orta pH değerlerinde iletkenlik artar, bu durum çözeltideki serbest iyonların miktarının yükseldiğini ve daha düşük uranyum iyonu adsorpsiyonu olduğunu gösterebilir. Daha yüksek pH değerlerinde ise iletkenlik tekrar aşırı bir düşüş gösterir ve bu da çözeltideki hidroksit iyonlarının azalışıyla ve adsorplanan uranyum iyonlarının kısmen daha yüksek olmasıyla ilişkilendirilebilir.

MFKNKK, düşük pH değerlerinde daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi, uygun zeta potansiyel değişimleri ve daha stabil elektriksel iletkenlik ile uranyum gideriminde MFK'ya kıyasla üstün performans göstermiştir. Bu bulgular, MFKNKK'nın uranyum iyonlarını daha etkili bir şekilde adsorbe ettiğini ve daha verimli bir giderim sağladığını kanıtlamaktadır.

Adsorbent Dozajının Etkisi

Adsorbent dozu veya katı/sıvı oranı, adsorpsiyon sisteminin adsorbent-adsorbat dengesini belirlemede ve dolayısıyla optimum adsorbent miktarını belirlemede önemli bir faktördür. U(VI) adsorpsiyonu üzerinde adsorbent dozunun etkisini incelemek amacıyla deneyler, 0,05, 0,10, 0,15, 0,20 ve 0,25 g/100 mL katı/sıvı oranlarında gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler Tablo 18 ve 19'da sunulmuştur.

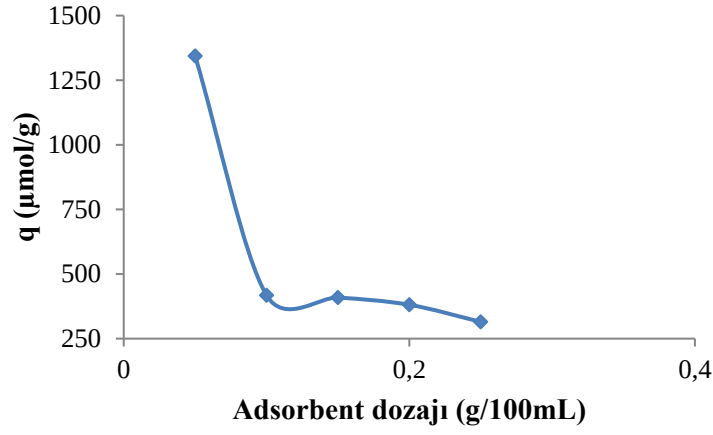
Tablo 18. MFKNKK Adsorbenti İçin Katı Sıvı Oranı (Adsorbent Dozajı) Etkininin İncelendiği Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

C_b (μM)	dozaj g /100 mL	C_d (μM)	q (μmol/g)	%R
1200	0,05	528	1344	56
1200	0,1	573	418	52
1200	0,15	586	409	51
1200	0,2	437	381	64
1200	0,25	411	315	66

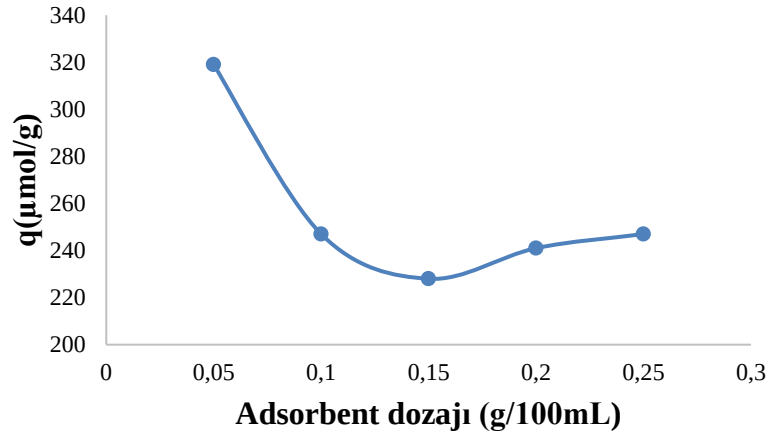
Tablo 19. MFK Adsorbenti İçin Katı Sıvı Oranı (Adsorbent Dozajı) Etkininin İncelendiği Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar

C_b (μM)	dozaj g/100 mL	C_d (μM)	q (μmol/g)	%R
1200	0,05	888	156	26
1200	0,1	706	247	41,19
1200	0,15	745	228	37,93
1200	0,2	719	241	40,1
1200	0,25	706	247	41,19

Şekil 37'de MFKNKK ve MFK adsorbentleri için adsorpsiyon kapasitesinin (q) adsorbent dozu (g/100mL) ile değişimini göstermektedir.



(a)

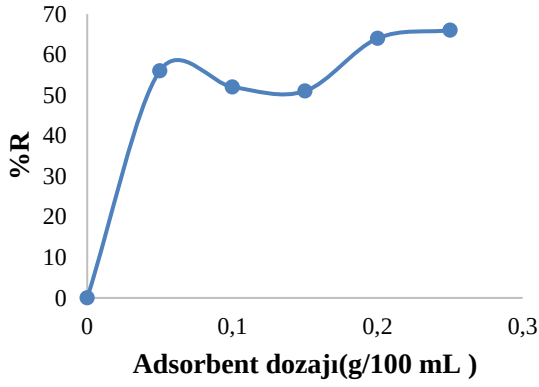


(b)

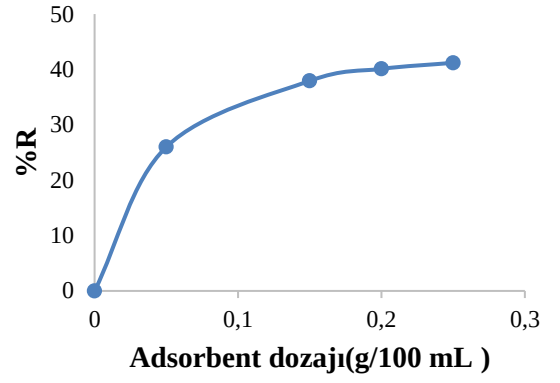
Şekil 37. Adsorbent dozuyla U (VI)'nin adsorplanan miktarının değişimi a) MFKNKK adsorbenti b) MFK adsorbenti (başlangıç konsantrasyonu: 1200 μM , sıcaklık: 25°C, süre: 90 dk, doğal pH: 4,3 ve çalkalama hızı: 150 dk^{-1})

MFKNKK adsorbentinde, düşük dozajlarda adsorpsiyon kapasitesi oldukça yüksektir, bu da adsorbent yüzeyinde daha fazla uranyum adsorbe edebilmesiyle açıklanabilir. Orta dozajlarda, adsorbent dozajı arttıkça adsorpsiyon kapasitesi giderek azalır ve daha sonra hemen hemen sabit kalır. Bu davranış, artan dozajla adsorplanan miktarın azaldığı şeklinde yorumlanabilecekmiş gibi görünse de gerçekte, adsorplanma oranının artışı ile adsorbent dozajının artma oranının paralel olmamasıyla ilgilidir. Yüksek dozajlarda adsorpsiyon kapasitesinin sabit kalması veya çok az değişmesi, adsorbent yüzeylerinin tamamen doygun hale gelmesiyle açıklanabilir. MFK adsorbentinde de benzer değişme eğilimi gözlenmiştir. Gerçek durumu dah açık bir şekilde ortaya koymak için, adsornt dozajı ile giderim yüzdesinin değişimi, Şekil 38 a ve b'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu şekilden beklendiğigibi her iki

adsorbent için de artan doajla giderim yüzdesinin arttığı görülebilir ve optimum değer olarak 0,2 g/100mL alınabilir.



(a)



(b)

Şekil 38. Adsorbent dozuyla U(VI)'nin giderim yüzdesinin değişimi a) MFKNKK adsorbenti b) MFK adsorbenti (başlangıç konsantrasyonu: 1200 μ M, sıcaklık: 25°C, süre: 90 dakika, doğal pH: 4,3 ve çalkalama hızı: 150 dk⁻¹)

SONUÇLAR

Bu çalışma, sulu çözeltilerden U(VI) iyonlarının adsorpsiyonu yoluyla uzaklaştırılması için MFKNKK ve MFK olmak üzere iki adsorbent kullanıldı. Başlangıç adsorbat konsantrasyonu, sıcaklık, temas süresi, başlangıç pH ve adsorbent dozu gibi işlem parametrelerinin incelenmesine odaklanmaktadır.

Adsorpsiyon kinetiği üzerine yapılan çalışmalar, adsorpsiyon dengesine ulaşmak 90 dakikanın yeterli olduğunu ve verilerin yalancı ikinci derece kinetik modeline yüksek bir uyum gösterdiğini bulundu. Adsorpsiyon İzoterm analizi, verilerin Tip III izoterm ve Halsey modeline yüksek uyum gösterdiğini ortaya koydu. Bu uyumluluk temel alınarak, U(VI)/MFKNKK ve U(VI)/MFK adsorpsiyon sistemi için iki bölgeyi içeren ve elektrostatik ve kompleks oluşumu olarak tanımlanabilen adsorpsiyon mekanizması önerilmektedir.

Bu bağlamda, termodinamik analizlerde, adsorpsiyon izostatik entalpi ve entropi değerleri ayrı ayrı ilk ve ikinci bölgeler için hesaplandı. Böylece, farklı büyüklükte ve işaretle entalpi ve entropi değişim değerleri elde edildi. MFKNKK ve MFK için sırasıyla, 3,65 ve -51,02 kJ/mol, 1,77 ve -167,28 J/Kmol değerleri hesaplanmıştır.

Deneysel sonuçlar, daha düşük pH'ların adsorpsiyon verimliliği açısından daha uygun olduğunu ve 0,1g/100mL'lik bir adsorbent dozunun etkili adsorpsiyon için uygun olduğunu gösterdi.

Sıcaklıkla MFKNKK ve MFK adsorbentlerinin U(VI) giderim performanslarını değerlendirildiğinde, her iki adsorbentin de yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmektedir. Ancak, genel olarak bakıldığında MFKNKK, yüksek denge U(VI) konsantrasyonlarında daha yüksek bir adsorpsiyon kapasitesi göstermektedir. MFK adsorbenti ise, benzer koşullarda daha düşük bir adsorpsiyon kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, MFKNKK adsorbenti, genel olarak MFK adsorbentinden daha iyi bir performans sergilediği açıktır. Özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek U(VI) konsantrasyonlarında daha etkin bir adsorpsiyon sağlamaktadır.

Başlangıç pH'sının adsorpsiyon kapasitesi, yüzey yükü ve çözeltideki iyonik türler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Düşük pH değerlerinde uranyum iyonlarının daha iyi adsorbe edildiği, zeta potansiyelinin ve elektriksel iletkenliğin adsorpsiyon sürecinde belirgin etkileri olduğu sonucuna varılabilir.

Sonuç olarak, hazırlanan nanokompozit köpük adsorbentların, sulu çözeltilerden U (VI)'in etkili bir şekilde uzaklaştırılması için etkili ve potansiyel bir alternatif oldukları iddia edilebilir.



KAYNAKLAR

- Abney, C.W., Mayes, R.T., Saito, T. and Dai, S., 2017. Materials for the recovery of uranium from seawater. *Chemical reviews*, 117(23), pp.13935-14013.
- Adusei, J.K., Agorku, E.S., Voegborlo, R.B., Ampong, F.K., Awarikabey, E., Danu, B.Y. and Amarh, F.A., 2023. Zero valent iron impregnated sodium alginate grafted (acrylamide-co-acrylic acid) adsorbents for the removal of methylene blue in aqueous systems. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 62(6), pp.265-279.
- Ahmad, M., Ren, J., Zhang, Y., Kou, H., Zhang, Q. and Zhang, B., 2022. Simple and facile preparation of tunable chitosan tubular nanocomposite microspheres for fast uranium (VI) removal from seawater. *Chemical Engineering Journal*, 427, p.130934.
- Ahn, K.H. and Song, K.G., 1999. Treatment of domestic wastewater using microfiltration for reuse of wastewater. *Desalination*, 126(1-3), pp.7-14.
- Akash, S., Sivaprakash, B., Raja, V.V., Rajamohan, N. and Muthusamy, G., 2022. Remediation techniques for uranium removal from polluted environment–Review on methods, mechanism and toxicology. *Environmental Pollution*, 302, p.119068.
- Akl, Z.F., 2021. Theoretical and experimental studies on uranium (vi) adsorption using phosphine oxide-coated magnetic nanoadsorbent. *RSC advances*, 11(62), pp.39233-39244.
- Akperov, E.O., Maharramov, A.M. and Akperov, O.G., 2009. Uranyl ion adsorption using novel cross-linked maleic anhydride-allyl propionate-styrene terpolymer. *Hydrometallurgy*, 100(1-2), pp.76-81.
- Ali, S., Khan, I., Khan, S.A., Sohail, M., Ahmed, R., ur Rehman, A., Ansari, M.S. and Morsy, M.A., 2017. Electrocatalytic performance of Ni@ Pt core-shell nanoparticles supported on carbon nanotubes for methanol oxidation reaction. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 795, pp.17-25.
- Aly, M.M. and Hamza, M.F., 2013. A review: studies on uranium removal using different techniques. Overview. *Journal of dispersion science and technology*, 34(2), pp.182-213.
- Anirudhan, T.S. and Deepa, J.R., 2015. Synthesis and characterization of multi-carboxyl-functionalized nanocellulose/nanobentonite composite for the adsorption of uranium (VI) from aqueous solutions: Kinetic and equilibrium profiles. *Chemical Engineering Journal*, 273, pp.390-400.
- Aqel, A., Abou El-Nour, K.M., Ammar, R.A. and Al-Warthan, A., 2012. Carbon nanotubes, science and technology part (I) structure, synthesis and characterisation. *Arabian Journal of Chemistry*, 5(1), pp.1-23.
- Astefanei, A., Núñez, O. and Galceran, M.T., 2015. Characterisation and determination of fullerenes: a critical review. *Analytica chimica acta*, 882, pp.1-21.
- Atun, G. and Kilislioglu, A., 2002. The adsorption behavior of natural sand in contact with uranium contaminated seawater. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 37(7), pp.1295-1305.
- Babich, I.V. and Moulijn, J.A., 2003. Science and technology of novel processes for deep desulfurization of oil refinery streams: a review☆. *Fuel*, 82(6), pp.607-631.
- Bachmaf, S., Planer-Friedrich, B. and Merkel, B.J., 2008. Effect of sulfate, carbonate, and phosphate on the uranium (VI) sorption behavior onto bentonite. *Radiochimica Acta*, 96(6), pp.359-366.

- Baraka, A., 2006. Removal of heavy metals from aqueous solutions by novel melamine-formaldehyde-polyaminopolycarboxylic acid chelating adsorbents.
- Basu, H., Singhal, R.K., Saha, S. and Pimple, M.V., 2017. Chitosan impregnated Ca-alginate: a new hybrid material for removal of uranium from potable water. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 314, pp.1905-1914.
- Belloni, F., Kütahyalı, C., Rondinella, V.V., Carbol, P., Wiss, T. and Mangione, A., 2009. Can carbon nanotubes play a role in the field of nuclear waste management?.
- Bradbury, M.H. and Baeyens, B., 2002. Sorption of Eu on Na-and Ca-montmorillonites: Experimental investigations and modelling with cation exchange and surface complexation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(13), pp.2325-2334.
- Bradbury, M.H. and Baeyens, B., 2005. Experimental measurements and modeling of sorption competition on montmorillonite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(17), pp.4187-4197.
- Bradbury, M.H. and Baeyens, B., 2009. Sorption modelling on illite. Part II: Actinide sorption and linear free energy relationships. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(4), pp.1004-1013.
- C Thomas, S., Kumar Mishra, P. and Talegaonkar, S., 2015. Ceramic nanoparticles: fabrication methods and applications in drug delivery. *Current pharmaceutical design*, 21(42), pp.6165-6188.
- Catalano, J.G. and Brown Jr, G.E., 2005. Uranyl adsorption onto montmorillonite: Evaluation of binding sites and carbonate complexation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(12), pp.2995-3005.
- Chellam, S. and Clifford, D.A., 2002. Physical-chemical treatment of groundwater contaminated by leachate from surface disposal of uranium tailings. *Journal of Environmental Engineering*, 128(10), pp.942-952.
- Chen, F., Lv, M., Ye, Y., Miao, S., Tang, X., Liu, Y., Liang, B., Qin, Z., Chen, Y., He, Z. and Wang, Y., 2022. Insights on uranium removal by ion exchange columns: the deactivation mechanisms, and an overlooked biological pathway. *Chemical Engineering Journal*, 434, p.134708.
- Chen, S., Hong, J., Yang, H. and Yang, J., 2013. Adsorption of uranium (VI) from aqueous solution using a novel graphene oxide-activated carbon felt composite. *Journal of Environmental Radioactivity*, 126, pp.253-258.
- Chen, Z., Wang, J., Yu, F., Zhang, Z. and Gao, X., 2015. Preparation and properties of graphene oxide-modified poly (melamine-formaldehyde) microcapsules containing phase change material n-dodecanol for thermal energy storage. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(21), pp.11624-11630.
- Chisholm-Brause, C., Conradson, S.D., Buscher, C.T., Eller, P.G. and Morris, D.E., 1994. Speciation of uranyl sorbed at multiple binding sites on montmorillonite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(17), pp.3625-3631.
- Chu, J.M., 2013. Developing and diffusing green technologies: the impact of intellectual property rights and their justification. *J. Energy, Climate, & Env't*, 4, p.53.
- Das, B.M. and Sobhan, K., 1990. Principles of geotechnical engineering.
- Dent, A.J., Ramsay, J.D. and Swanton, S.W., 1992. An EXAFS study of uranyl ion in solution and sorbed onto silica and montmorillonite clay colloids. *Journal of colloid and interface science*, 150(1), pp.45-60.

- DeSilva, F., 2005. Uranium removal by ion exchange. *Water Quality Products Magazine*, Scranton Gillette Communications, Arlington Heights, IL.
- Dinçer, H. and Güneş, Ü., 2015. IV. Türkiye Lisansüstü Çalışmaları Kongresi (TLÇK) Bildiriler Kitabı. Dumlupınar Üniversitesi.
- Dinis, M.D.L. and Fiúza, A., 2021. Mitigation of uranium mining impacts—a review on groundwater remediation technologies. *Geosciences*, 11(6), p.250.
- Dreaden, E.C., Alkilany, A.M., Huang, X., Murphy, C.J. and El-Sayed, M.A., 2012. The golden age: gold nanoparticles for biomedicine. *Chemical Society Reviews*, 41(7), pp.2740-2779.
- El Maguana, Y., Elhadiri, N., Benchanaa, M. and Chikri, R., 2020. Activated carbon for dyes removal: modeling and understanding the adsorption process. *Journal of Chemistry*, 2020(1), p.2096834.
- Elliott, J.A., Shibuta, Y., Amara, H., Bichara, C. and Neyts, E.C., 2013. Atomistic modelling of CVD synthesis of carbon nanotubes and graphene. *Nanoscale*, 5(15), pp.6662-6676.
- El-Maghrabi, H.H., Abdelmaged, S.M., Nada, A.A., Zahran, F., Abd El-Wahab, S., Yahea, D., Hussein, G.M. and Atrees, M.S., 2017. Magnetic graphene based nanocomposite for uranium scavenging. *Journal of hazardous materials*, 322, pp.370-379.
- Elwakeel, K.Z., Atia, A.A. and Guibal, E., 2014. Fast removal of uranium from aqueous solutions using tetraethylenepentamine modified magnetic chitosan resin. *Bioresource technology*, 160, pp.107-114.
- Fernandes, M.M., Baeyens, B., Dähn, R., Scheinost, A.C. and Bradbury, M.H., 2012. U (VI) sorption on montmorillonite in the absence and presence of carbonate: A macroscopic and microscopic study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 93, pp.262-277.
- Fernandes, M.M., Vér, N. and Baeyens, B., 2015. Predicting the uptake of Cs, Co, Ni, Eu, Th and U on argillaceous rocks using sorption models for illite. *Applied Geochemistry*, 59, pp.189-199.
- Fomina, M. and Gadd, G.M., 2014. Biosorption: current perspectives on concept, definition and application. *Bioresource technology*, 160, pp.3-14.
- Foo, K.Y. and Hameed, B.H., 2012. Coconut husk derived activated carbon via microwave induced activation: effects of activation agents, preparation parameters and adsorption performance. *Chemical Engineering Journal*, 184, pp.57-65.
- Foster, C., Shaw, S., Neill, T.S., Bryan, N., Sherriff, N., Natrajan, L.S., Wilson, H., Lopez-Odriozola, L., Rigby, B., Haigh, S.J. and Zou, Y.C., 2022. Hydrotalcite colloidal stability and interactions with uranium (VI) at neutral to alkaline pH. *Langmuir*, 38(8), pp.2576-2589.
- Galamini, G., Ferretti, G., Medoro, V., Tescaro, N., Faccini, B. and Coltorti, M., 2020. Isotherms, kinetics, and thermodynamics of nh_4^+ adsorption in raw liquid manure by using natural chabazite zeolite-rich tuff. *Water*, 12(10), p.2944.
- Geckeis, H., Lützenkirchen, J., Polly, R., Rabung, T. and Schmidt, M., 2013. Mineral–water interface reactions of actinides. *Chemical reviews*, 113(2), pp.1016-1062.
- Ghasemi, J.B. and Zolfonoun, E., 2010. Simultaneous spectrophotometric determination of trace amounts of uranium, thorium, and zirconium using the partial least squares method after their preconcentration by α -benzoin oxime modified Amberlite XAD-2000 resin. *Talanta*, 80(3), pp.1191-1197.

- Guillaumont, R. and Mompean, F.J., 2003. Update on the chemical thermodynamics of uranium, neptunium, plutonium, americium and technetium (Vol. 5, pp. 64-70). Amsterdam: Elsevier.
- Gürses, A. and Barın, T.B., 2023. Preparation, Structural Characterization and Evaluation of Some Dynamic and Rheological Properties of a New Type of Clay Containing Mastic Material, Clay-Mastic. *Minerals*, 13(5), p.705.
- Gürses, A. and Şahin, E., 2023. Preparation of Melamine Formaldehyde Foam and a Melamine-Formaldehyde-Organo-Clay Nanocomposite and Hybrid Composites. *Minerals*, 13(11), p.1407.
- Gürses, A., Doğar, Ç., Köktepe, S., Mindivan, F., Güneş, K. and Aktürk, S., 2015. Investigation of Thermal Properties of PUF/colored Organoclay Nanocomposites. *Acta Physica Polonica A*, 127(4), pp.979-983.
- Gürses, A., Doğar, Ç., Yalcın, M., Açıkyıldız, M., Bayrak, R. and Karaca, S., 2006. The adsorption kinetics of the cationic dye, methylene blue, onto clay. *Journal of Hazardous Materials*, 131(1-3), pp.217-228.
- Gürses, A., Güneş, K., Şahin, E. and Açıkyıldız, M., 2023. Investigation of the removal kinetics, thermodynamics and adsorption mechanism of anionic textile dye, Remazol Red RB, with powder pumice, a sustainable adsorbent from waste water. *Frontiers in Chemistry*, 11, p.1156577.
- Ho, Y.S. and McKay, G., 1999. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process biochemistry*, 34(5), pp.451-465.
- Hritcu, D., Humelnicu, D., Dodi, G. and Popa, M.I., 2012. Magnetic chitosan composite particles: evaluation of thorium and uranyl ion adsorption from aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), pp.1185-1191.
- Huang, M., Xie, L., Wang, Y., Feng, X., Gao, J., Lou, Z. and Xiong, Y., 2023. Efficient and selective capture of uranium by polyethyleneimine-modified chitosan composite microspheres from radioactive nuclear waste. *Environmental Pollution*, 316, p.120550.
- Hubbe, M.A., Azizian, S. and Douven, S., 2019. Implications of apparent pseudo-second-order adsorption kinetics onto cellulosic materials: A review. *BioResources*, 14(3).
- Huikuri, P. and Salonen, L., 2000. Removal of uranium from Finnish groundwaters in domestic use with a strong base anion resin. *Journal of Radioanalytical and Nuclear chemistry*, 245, pp.385-393.
- Ibrahim, K.S., 2013. Carbon nanotubes? properties and applications: A review. *Carbon letters*, 14(3), pp.131-144.
- Ibrahim, W.A.W., Nodeh, H.R. and Sanagi, M.M., 2016. Graphene-based materials as solid phase extraction sorbent for trace metal ions, organic compounds, and biological sample preparation. *Critical reviews in analytical chemistry*, 46(4), pp.267-283.
- Jeon, H.J., Ko, C.H., Kim, S.H. and Kim, J.N., 2009. Removal of refractory sulfur compounds in diesel using activated carbon with controlled porosity. *Energy & fuels*, 23(5), pp.2537-2543.
- Johnson, D., Leake, J.R. and Read, D.J., 2002. Transfer of recent photosynthate into mycorrhizal mycelium of an upland grassland: short-term respiratory losses and accumulation of ¹⁴C. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(10), pp.1521-1524.
- Joseph, C., Van Loon, L.R., Jakob, A., Steudtner, R., Schmeide, K., Sachs, S. and Bernhard, G., 2013. Diffusion of U (VI) in Opalinus Clay: Influence of temperature and humic acid. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 109, pp.74-89.

- Joseph, L., Jun, B.M., Flora, J.R., Park, C.M. and Yoon, Y., 2019. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. *Chemosphere*, 229, pp.142-159.
- Karve, M. and Rajgor, R.V., 2008. Amberlite XAD-2 impregnated organophosphinic acid extractant for separation of uranium (VI) from rare earth elements. *Desalination*, 232(1-3), pp.191-197.
- Kaur, H., Kumar, V., Kumar, K., Rathor, S., Kumari, P. and Singh, J., 2016. Polymer particulates in drug delivery. *Current Pharmaceutical Design*, 22(19), pp.2761-2787.
- Keith, L.S. and Faroon, O.M., 2022. Uranium. In *Handbook on the Toxicology of Metals* (pp. 885-936). Academic Press.
- Khan, I., Saeed, K. and Khan, I., 2019. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry*, 12(7), pp.908-931.
- Khan, I., Saeed, K. and Khan, I., 2019. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry*, 12(7), pp.908-931.
- Kilislioglu, A. and Bilgin, B., 2002. Adsorption of uranium on halloysite. *Radiochimica Acta*, 90(3), pp.155-160.
- Korichi, S. and Bensmaili, A., 2009. Sorption of uranium (VI) on homoionic sodium smectite experimental study and surface complexation modeling. *Journal of hazardous materials*, 169(1-3), pp.780-793.
- Kowal-Fouchard, A., Drot, R., Simoni, E. and Ehrhardt, J.J., 2004. Use of spectroscopic techniques for uranium (VI)/montmorillonite interaction modeling. *Environmental science & technology*, 38(5), pp.1399-1407.
- Köroğlu, F.N., 2004. Nitrofenollerin iyonik ve iyonik olmayan organobentonitlere adsorpsiyon ve desorpsiyonu. *Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Lisans Tezi, Ankara*.
- Kütahyalı, C. and Eral, M., 2010. Sorption studies of uranium and thorium on activated carbon prepared from olive stones: kinetic and thermodynamic aspects. *Journal of Nuclear Materials*, 396(2-3), pp.251-256.
- Ladeira, A.C.Q. and Morais, C.A.D., 2005. Uranium recovery from industrial effluent by ion exchange—column experiments. *Minerals engineering*, 18(13-14), pp.1337-1340.
- Lagergren, S., 1898. About the theory of so-called adsorption of soluble substances.
- Laurent, S., Forge, D., Port, M., Roch, A., Robic, C., Vander Elst, L. and Muller, R.N., 2008. Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications. *Chemical reviews*, 108(6), pp.2064-2110.
- Lee, N., Choi, S. H., & Hyeon, T., 2012. Nano-sized MRI contrast agents for newly emerging molecular imaging. **Chemical Society Reviews**, 41(7), 2575-2589.
- Lian, P., Zhu, X., Liang, S., Li, Z., Yang, W. and Wang, H., 2010. Large reversible capacity of high quality graphene sheets as an anode material for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 55(12), pp.3909-3914.
- Lin, Z., Chen, L., Ye, Z., Chen, X., Wang, X. and Wei, Y., 2021. Film-like chitin/polyethylenimine biosorbent for highly efficient removal of uranyl-carbonate compounds from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), p.105340.
- Liu, C., Li, Y., Liu, S., Zhou, Y., Li, B., Liu, D., Fu, C. and Ye, L., 2022. Polyethylenimine embellished multiwalled carbon nanotube (MWCNTs) for efficiently enhancing

- sequestration of uranium (VI) from seawater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5), p.108513.
- Liu, Y., Tang, X., Zhou, L., Liu, Z., Ouyang, J., Dai, Y., Le, Z. and Adesina, A.A., 2022. Nanofabricated chitosan/graphene oxide electrodes for enhancing electrosorptive removal of U (VI) from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 290, p.120827.
- Lv, Z., Wang, H., Chen, C., Yang, S., Chen, L., Alsaedi, A. and Hayat, T., 2019. Enhanced removal of uranium (VI) from aqueous solution by a novel Mg-MOF-74-derived porous MgO/carbon adsorbent. *Journal of colloid and interface science*, 537, pp.A1-A10.
- Majd, M.M., Kordzadeh-Kermani, V., Ghalandari, V., Askari, A. and Sillanpää, M., 2022. Adsorption isotherm models: A comprehensive and systematic review (2010– 2020). *Science of The Total Environment*, 812, p.151334.
- Mansha, M., Khan, I., Ullah, N. and Qurashi, A., 2017. Synthesis, characterization and visible-light-driven photoelectrochemical hydrogen evolution reaction of carbazole-containing conjugated polymers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), pp.10952-10961.
- McKinley, J.P., Zachara, J.M., Smith, S.C. and Turner, G.D., 1995. The influence of uranyl hydrolysis and multiple site-binding reactions on adsorption of U (VI) to montmorillonite. *Clays and clay minerals*, 43, pp.586-598.
- Merdivan, M., Düz, M.Z. and Hamamci, C., 2001. Sorption behaviour of uranium (VI) with N, N-dibutyl-N'-benzoylthiourea impregnated in Amberlite XAD-16. *Talanta*, 55(3), pp.639-645.
- Metilda, P., Sanghamitra, K., Gladis, J.M., Naidu, G.R.K. and Rao, T.P., 2005. Amberlite XAD-4 functionalized with succinic acid for the solid phase extractive preconcentration and separation of uranium (VI). *Talanta*, 65(1), pp.192-200.
- Metwally, E., Saleh, A.S. and HA, E.N., 2005. Extraction and separation of uranium (VI) and thorium (IV) using tri-n-dodecylamine impregnated resins. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*, 6(2), pp.119-126.
- Michard, P., Guibal, E., Vincent, T. and Le Cloirec, P., 1996. Sorption and desorption of uranyl ions by silica gel: pH, particle size and porosity effects. *Microporous materials*, 5(5), pp.309-324.
- Mirjalili, K. and Roshani, M., 2007. Resin-in-pulp method for uranium recovery from leached pulp of low grade uranium ore. *Hydrometallurgy*, 85(2-4), pp.103-109.
- Mishra, R.K., Chianella, I., Goel, S. and Nezhad, H.Y., 2022. Exploring the Nexus Between Structure, Properties and Applications in Graphene Conductors. *Biomaterials and Polymers Horizon*, 1.
- Morreale, M., Liga, A., Mistretta, M.C., Ascione, L. and La Mantia, F.P., 2015. Mechanical, thermomechanical and reprocessing behavior of green composites from biodegradable polymer and wood flour. *Materials*, 8(11), pp.7536-7548.
- Nakajima, A. and Sakaguchi, T., 1999. Recovery of uranium from uranium refining waste water by using immobilized persimmon tannin. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 242(3), pp.623-626.
- Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Iravani, S. and Varma, R.S., 2021. Starch, cellulose, pectin, gum, alginate, chitin and chitosan derived (nano) materials for sustainable water treatment: A review. *Carbohydrate polymers*, 251, p.116986.

- Oguntimein, G.B., 2015. Biosorption of dye from textile wastewater effluent onto alkali treated dried sunflower seed hull and design of a batch adsorber. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(4), pp.2647-2661.
- Pabalan, R.T. and Turner, D.R., 1996. Uranium (6+) sorption on montmorillonite: Experimental and surface complexation modeling study. *Aquatic Geochemistry*, 2(3), pp.203-226.
- Patel, H.A., Somani, R.S., Bajaj, H.C. and Jasra, R.V., 2006. Nanoclays for polymer nanocomposites, paints, inks, greases and cosmetics formulations, drug delivery vehicle and waste water treatment. *Bulletin of Materials Science*, 29, pp.133-145.
- Peng, H. and Guo, J., 2020. Removal of chromium from wastewater by membrane filtration, chemical precipitation, ion exchange, adsorption electrocoagulation, electrochemical reduction, electrodialysis, electrodeionization, photocatalysis and nanotechnology: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(6), pp.2055-2068.
- Police, S., Maity, S., Chaudhary, D.K., Sahu, S.K. and Vinod Kumar, A., 2020. An investigation on the efficiency of low-cost adsorbents in removing uranium from water samples. *Applied Water Science*, 10(10), pp.1-13.
- Prados, J., Melguizo, C., Ortiz, R., Vélez, C., J Alvarez, P., L Arias, J., A Ruiz, M., Gallardo, V. and Aranega, A., 2012. Doxorubicin-loaded nanoparticles: new advances in breast cancer therapy. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry (Formerly Current Medicinal Chemistry-Anti-Cancer Agents)*, 12(9), pp.1058-1070.
- Qadeer, R. and Hanif, J., 1995. Adsorption of dysprosium ions on activated charcoal from aqueous solutions. *Carbon*, 33(2), pp.215-220.
- Rahmati, A., Ghaemi, A. and Samadfam, M., 2012. Kinetic and thermodynamic studies of uranium (VI) adsorption using Amberlite IRA-910 resin. *Annals of Nuclear Energy*, 39(1), pp.42-48.
- Rao, J.P. and Geckeler, K.E., 2011. Polymer nanoparticles: Preparation techniques and size-control parameters. *Progress in polymer science*, 36(7), pp.887-913.
- Ray, S.S. and Okamoto, M., 2003. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Progress in polymer science*, 28(11), pp.1539-1641.
- Rosenberg, E., Pinson, G., Tsosie, R., Tutu, H. and Cukrowska, E., 2016. Uranium remediation by ion exchange and sorption methods: a critical review. *Johnson Matthey Technology Review*, 60(1), pp.59-77.
- Rudresh, B.M., Ravi Kumar, B.N. and Lingesh, B.V., 2017. Fibrization effect on the mechanical behavior of PA66/PTFE blend based fibrous composites. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70, pp.2683-2694.
- Rudresh, B.M., Ravi Kumar, B.N. and Madhu, D.J.A.C., 2019. Combined effect of micro-and nano-fillers on mechanical, thermal, and morphological behavior of glass-carbon PA66/PTFE hybrid nano-composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2, pp.176-188.
- Sadeghi, M., Amiri, M., Roshanfarzad, P., Avila, M. and Tenreiro, C., 2008. Radiochemical studies relevant to the no-carrier-added production of ^{61}Cu , ^{64}Cu at a cyclotron. *Radiochimica Acta*, 96(7), pp.399-402.
- Sanchez-Salvador, J.L., Balea, A., Monte, M.C., Negro, C. and Blanco, A., 2021. Chitosan grafted/cross-linked with biodegradable polymers: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 178, pp.325-343.

- Santos, E.C.D., Bandeira, R.M., Vega, M.L. and Santos, J.R.D., 2021. Poly (melamine-formaldehyde-silica) composite hydrogel for methylene blue removal. *Materials Research*, 24(4), p.e20200574.
- Schnurr, A., Marsac, R., Rabung, T., Lützenkirchen, J. and Geckeis, H., 2015. Sorption of Cm (III) and Eu (III) onto clay minerals under saline conditions: Batch adsorption, laser-fluorescence spectroscopy and modeling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 151, pp.192-202.
- Sellin, P. and Leupin, O.X., 2013. The use of clay as an engineered barrier in radioactive-waste management a review. *Clays and Clay Minerals*, 61, pp.477-498.
- Semnani, F., Asadi, Z., Samadfam, M. and Sepehrian, H., 2012. Uranium (VI) sorption behavior onto amberlite CG-400 anion exchange resin: effects of pH, contact time, temperature and presence of phosphate. *Annals of nuclear energy*, 48, pp.21-24.
- Sigmund, W., Yuh, J., Park, H., Maneeratana, V., Pyrgiotakis, G., Daga, A., Taylor, J. and Nino, J.C., 2006. Processing and structure relationships in electrospinning of ceramic fiber systems. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(2), pp.395-407.
- Singh, B., Sharma, D.K., Kumar, R. and Gupta, A., 2009. Controlled release of the fungicide thiram from starch–alginate–clay based formulation. *Applied Clay Science*, 45(1-2), pp.76-82.
- Singh, P.P., 2021. Natural polymer-based hydrogels for adsorption applications. In *Natural polymers-based green adsorbents for water treatment* (pp. 267-306). Elsevier.
- Stockmann, M., Fritsch, K., Bok, F., Fernandes, M.M., Baeyens, B., Steudtner, R., Müller, K., Nebelung, C., Brendler, V., Stumpf, T. and Schmeide, K., 2022. New insights into U (VI) sorption onto montmorillonite from batch sorption and spectroscopic studies at increased ionic strength. *Science of The Total Environment*, 806, p.150653.
- Stumpf, T., Bauer, A., Coppin, F., Fanghänel, T. and Kim, J.I., 2002. Inner-sphere, outer-sphere and ternary surface complexes: a TRLFS study of the sorption process of Eu (III) onto smectite and kaolinite. *Radiochimica Acta*, 90(6), pp.345-349.
- Sun, S., Murray, C.B., Weller, D., Folks, L. and Moser, A., 2000. Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices. *science*, 287(5460), pp.1989-1992.
- Sylwester, E.R., Hudson, E.A. and Allen, P.G., 2000. The structure of uranium (VI) sorption complexes on silica, alumina, and montmorillonite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(14), pp.2431-2438.
- Tan, L., Wang, Y., Liu, Q., Wang, J., Jing, X., Liu, L., Liu, J. and Song, D., 2015. Enhanced adsorption of uranium (VI) using a three-dimensional layered double hydroxide/graphene hybrid material. *Chemical Engineering Journal*, 259, pp.752-760.
- Topsøe, H., Clausen, B.S. and Massoth, F.E., 1996. *Hydrotreating catalysis* (pp. 1-269). Springer Berlin Heidelberg.
- Tsang, C.F., Bernier, F. and Davies, C., 2005. Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays—in the context of radioactive waste disposal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42(1), pp.109-125.
- Tsuruta, S., Teter, M.A., Takatsuka, T., Tatsumi, T. and Tamagaki, R., 2002. Confronting neutron star cooling theories with new observations. *The Astrophysical Journal*, 571(2), p. L143.

- Ugbe, F.A. and Abdus-Salam, N., 2020. Kinetics and thermodynamic modelling of natural and synthetic goethite for dyes scavenging from aqueous systems. *Arabian Journal of Chemical and Environmental Research*, 7(1), pp.12-28.
- Wang, C., Huang, D., He, F., Jin, T., Huang, B., Xu, J. and Qian, Y., 2020. Efficient removal of uranium (VI) from aqueous solutions by triethylenetetramine-functionalized single-walled carbon nanohorns. *ACS omega*, 5(43), pp.27789-27799.
- Wang, J.S., Bao, Z.L., Chen, S.G. and Yang, J.H., 2011. Removal of uranium from aqueous solution by chitosan and ferrous ions.
- Wang, Y., Gu, Z., Yang, J., Liao, J., Yang, Y., Liu, N. and Tang, J., 2014. Amidoxime-grafted multiwalled carbon nanotubes by plasma techniques for efficient removal of uranium (VI). *Applied surface science*, 320, pp.10-20.
- Wang, Y., Gu, Z., Yang, J., Liao, J., Yang, Y., Liu, N. and Tang, J., 2014. Amidoxime-grafted multiwalled carbon nanotubes by plasma techniques for efficient removal of uranium (VI). *Applied surface science*, 320, pp.10-20.
- Wanyika, H. and Gachanja, A., 2016. Instrumental characterization of montmorillonite clays by X-ray fluorescence spectroscopy, fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction and uv/visible spectrophotometry. *Journal of agriculture, science and technology*, 17(1), pp.224-239.
- Wei, K., Wang, Q., Huang, L. and Sun, L., 2016. Amino-functionalized urea-formaldehyde framework mesoporous silica for U (VI) adsorption in wastewater treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(48), pp.12420-12429.
- Xia, H., Ren, Q., Lv, J., Wang, Y., Feng, Z., Li, Y., Wang, C., Liu, Y. and Wang, Y., 2023. Hydrothermal fabrication of phytic acid decorated chitosan-graphene oxide composites for efficient and selective adsorption of uranium (VI). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), p.110760.
- Xie, Y., Chen, C., Ren, X., Wang, X., Wang, H. and Wang, X., 2019. Emerging natural and tailored materials for uranium-contaminated water treatment and environmental remediation. *Progress in materials science*, 103, pp.180-234.
- Xue, J.H., Zhang, H., Ding, D.X., Hu, N., Wang, Y.D. and Wang, Y.S., 2019. Linear β -cyclodextrin polymer functionalized multiwalled carbon nanotubes as nano-adsorbent for highly effective removal of U (VI) from aqueous solution based on inner-sphere surface complexation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(10), pp.4074-4083.
- Xue, Y., Cao, M., Gao, J., Gui, Y., Chen, J., Liu, P., Ma, F., Yan, Y. and Qiu, M., 2021. Electroadsorption of uranium on amidoxime modified graphite felt. *Separation and Purification Technology*, 255, p.117753.
- Yang, R.T., 2003. *Adsorbents: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Yu, C., Xu, W., Zhao, X., Xu, J. and Jiang, M., 2014. Effects of the reaction degree of melamine-formaldehyde resin on the structures and properties of melamine-formaldehyde/polyvinyl alcohol composite fiber. *Fibers and Polymers*, 15, pp.1828-1834.
- Yuşan, S., 2016. U (VI) iyonlarının ham ve modifiye edilmiş diyatomit üzerine adsorpsiyon özelliklerinin kinetik ve termodinamik olarak incelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), pp.761-768.

- Zachara, J.M. and McKinley, J.P., 1993. Influence of hydrolysis on the sorption of metal cations by smectites: Importance of edge coordination reactions: Dedicated to Paul W. Schindler on his retirement. *Aquatic Sciences*, 55, pp.250-261.
- Zahran, F., El-Maghrabi, H.H., Hussein, G. and Abdelmaged, S.M., 2019. Fabrication of bentonite based nanocomposite as a novel low cost adsorbent for uranium ion removal. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 11, p.100205.
- Zare, F., Ghaedi, M., Daneshfar, A., Agarwal, S., Tyagi, I., Saleh, T.A. and Gupta, V.K., 2015. Efficient removal of radioactive uranium from solvent phase using AgOH–MWCNTs nanoparticles: Kinetic and thermodynamic study. *Chemical engineering journal*, 273, pp.296-306.
- Zeng, Q.H., Yu, A.B., Lu, G.Q. and Paul, D.R., 2005. Clay-based polymer nanocomposites: research and commercial development. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 5(10), pp.1574-1592.
- Zhang, X., Gu, P. and Liu, Y., 2019. Decontamination of radioactive wastewater: State of the art and challenges forward. *Chemosphere*, 215, pp.543-553.
- Zhang, Y., Mei, B., Shen, B., Jia, L., Liao, J. and Zhu, W., 2023. Preparation of biochar@chitosan-polyethyleneimine for the efficient removal of uranium from water environment. *Carbohydrate Polymers*, 312, p.120834.
- Zhang, Z. and Clifford, D.A., 1994. Exhausting and regenerating resin for uranium removal. *Journal-American Water Works Association*, 86(4), pp.228-241.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	: Arvin SEHHATIGDIRI
Doğum tarihi	:
Doğum Yeri	:
Uyruğu	:
Adres	:
Tel	:
E-mail	:
Eğitim	
Lise	:
Lisans	:
Yüksek lisans	:
Doktora	:
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce	:
Diğer	:
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	